

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**01.08 – ДП.2223 «С» 2023.12.07.63 ПЗ**

**Капля Богдан Борисович**

**2024**

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**01.08 – ДП.2223 «С» 2023.12.07.63 ПЗ**

**Капля Богдан Борисович**

**2024**

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко – технологічний факультет

УДК 629.113

ПОГОДЖЕНО  
Декан  
механіко – технологічний факультету  
(назва факультету (ННІ))

\_\_\_\_\_  
(підпис) Братішко В.В.  
(ПІБ)

“ ” \_\_\_\_\_ 2024 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач кафедри  
тракторів, автомобілів та біоенергоресурсів  
(назва кафедри)

\_\_\_\_\_  
(підпис) Калінін Є.І.  
(ПІБ)

“ ” \_\_\_\_\_ 2024 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «Покращення методики та засобів діагностування дизельних двигунів»

Спеціальність 208 «Агроінженерія»  
(код і назва)

Освітня програма Агроінженерія  
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

\_\_\_\_\_  
(науковий ступінь та вчене звання) д.т.н., професор \_\_\_\_\_  
(підпис) Братішко В.В.  
(ПІБ)

Керівник дипломного проєкту бакалавра

\_\_\_\_\_  
(науковий ступінь та вчене звання) к.т.н., доцент \_\_\_\_\_  
(підпис) Романченко В.М.  
(ПІБ)

Виконав

\_\_\_\_\_  
(підпис) Капля Богдан Борисович  
(ПІБ)

КИЇВ – 2024

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко-технологічний факультет

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

тракторів, автомобілів та

біоенергоресурсів

д.т.н., проф. \_\_\_\_\_ **Калінін Є.І.**

(наук. ступ., вч. звання) (підпис) (ПІБ)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**З А В Д А Н Н Я**

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи студенту

**Каплі Богдану Борисовичу**

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність \_\_\_\_\_ 208 «Агроінженерія»

(код і назва)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи на тему «Покращення методики та засобів  
діагностування дизельних двигунів»

затверджена наказом ректора НУБіП України від «07» грудня 2023р. №2223 «С»

Термін подання завершеної роботи (проекту) на кафедру: \_\_\_\_\_ 01.10.2024

(рік, місяць, число)

**Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи:** загальні дані по системам дизельних  
двигунів внутрішнього згоряння (СМД-62) та по принципам і методам їх діагностування

**Перелік питань які потрібно розробити**

Вступ. Стан питання, мета та задачі дослідження. Теоретичне основи діагностування дизельного  
двигуна. Програма і методика проведення експериментальних досліджень. Висновки.

**Перелік графічного матеріалу:** Загальні принципи використання дизельних двигунів та  
методичні аспекти їх діагностування. Теоретичне дослідження процесу діагностування  
дизельних двигунів. Експериментальні дослідження. Результати експериментальних  
досліджень. Висновки.

Дата видачі завдання «09» січня 2024 р.

Керівник дипломного проєкту бакалавра \_\_\_\_\_

( підпис )

**Романченко В.М.**

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_

( підпис )

**Капля Б.Б.**

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Основна частина дипломного проекту викладена на 70 сторінках пояснювальної записки і 13 слайдах презентації, має 2 таблиці та ілюстрована 60 рисунками.

Пояснювальна записка складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаної літератури.

Тема дипломного проекту: «Покращення методики та засобів діагностування дизельних двигунів».

Об'єктом досліджень обрано процес діагностування дизельного двигуна з газотурбінним нагнітачем (ГТН) та засоби для визначення технічного стану його систем.

Предметом досліджень є залежності, що дозволяють діагностувати паливну апаратуру високого тиску, а також оцінювати стан циліндро-поршневої групи та газотурбінного нагнітача дизельного двигуна на основі динамічних показників.

Мета роботи – вдосконалення методики та засобів діагностування циліндро-поршневої групи та систем паливо- та повітроподачі дизелів.

У кваліфікаційній роботі удосконалена методика діагностування, що дозволяє визначати залежності основних параметрів, за якими можна судити про технічний стан турбокомпресора, циліндро-поршневої групи та системи паливоподачі дизелів з газотурбінним наддувом. Для реалізації вдосконаленої методики скомплектовано діагностичний комплекс, що складається з персонального комп'ютера з розробленим програмним забезпеченням та датчиків з відповідною системою перетворення і аналізу сигналу.

Ключові слова: дизельний двигун, газотурбінний нагнітач, діагностика, потужність, момент.

## ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ.....	6
1.1 Етапи розвитку технічної діагностики.....	6
1.2 Класифікація методів та засобів діагностування основних параметрів двигунів.....	9
1.3 Методики та засоби діагностування технічного стану циліндро-поршневої групи та систем паливо- та повітряподачі.....	11
1.4 Визначення основних параметрів двигунів діагностичними комплексами .....	25
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ДІАГНОСТУВАННЯ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ.....	30
2.1 Програма теоретичних досліджень .....	30
2.2 Принципи проектування технології діагностування.....	30
2.3 Послідовність технології діагностування.....	32
2.4 Діагностичний комплекс .....	35
2.5 Методика комплексної діагностики дизельних двигунів .....	39
РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	49
3.1 Програма експериментальних досліджень .....	49
3.2 Методика діагностування основних показників дизелів .....	49
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	58
4.1 Результати діагностування параметрів досліджуваних двигунів за стандартними методиками .....	58
4.2 Результати хронометражу операцій комплексного діагностування двигунів за стандартними та запропонованими методиками.....	64
ВИСНОВКИ.....	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	68
ДОДАТКИ.....	71

# РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ

## 1.1 Етапи розвитку технічної діагностики

На сучасному етапі розвитку нашої держави в основі агропромислової політики стоїть завдання прискорення темпів зростання сільськогосподарської продукції, підвищення конкурентоспроможності, збільшення її частки у світовому сільськогосподарському виробництві [5, 6].

У сільському господарстві для виробництва продукції використовується величезна кількість різноманітної техніки. В результаті експлуатації машин погіршуються техніко-економічні показники, що пов'язано з процесами зношування вузлів та агрегатів, а також їх фізичним та моральним старінням.

Для забезпечення високої технічної готовності техніки необхідно контролювати її технічний стан, якісно та своєчасно проводити заходи щодо технічного обслуговування, ремонту та зберігання. Виконання цих робіт багато в чому залежить від рівня оснащення підприємств та кваліфікації інженерних кадрів.

У розробку методів та засобів технічного діагностування значний внесок зробили вчені та співробітники багатьох наукових організацій та вузів (С.А. Іофінов, Н.С. Ждановський, В.А. Алілуєв та багато інших).

Інтенсивний розвиток технічної діагностики як методу безрозбірного визначення стану техніки почався 1967 р. після організації лабораторії діагностики, хоча окремі розробки з діагностування сільськогосподарської техніки були виконані співробітником інституту В. І. Вельських вже на початку 1960-х рр. [6, 7].

У галузі теорії С. М. Міхліним, О. А. Сельцером та іншими вченими було створено методи прогнозування та управління технічним станом машин, обґрунтовані алгоритми оптимізації значень діагностичних і структурних параметрів, що допускаються, і міжконтрольного періоду

машин. Спільними зусиллями вчених та практиків було розроблено та знайшла широке застосування в сільському господарстві система ТО та Р машин.

Перший етап створення та масового виробництва засобів діагностування припадає на 1970-1971 рр. Були розроблені, поставлені на серійне виробництво та набули широкого поширення пересувні установки: діагностична установка КІ-4270, ремонтно-діагностична майстерня МПР 817Д, стаціонарні діагностичні комплекти КІ-5308А зі стендами КІ-4935. Значну участь у створенні цих засобів взяли С. І. Вельських, Н.Т. Іванов, В.І. Свентицький, К.Ю. Скібневський, В.Г. Фомін та ін. [4, 6].

Широке використання засобів технічного діагностування дозволило збільшити ресурс контрольованих деталей систем тракторів та комбайнів, а також скоротити експлуатаційні витрати в середньому на 30%.

Практично одночасно були розроблені та апробовані способи технічного діагностування тракторів та комбайнів за контрольованими діагностичними показниками та якісними ознаками.

У 1975 р. було розроблено та освоєно в серійному виробництві систему діагностичних засобів для тракторів, що включає переносні (базова конструкція – КІ-13901), пересувні та стаціонарні комплекси для всіх рівнів сільськогосподарського виробництва та різних видів ремонтно-обслуговуючих впливів.

Початок другого етапу розвитку технічної діагностики припав на 1980 р. Цей етап характерний застосуванням в діагностичних засобах електронних пристроїв, розробкою автоматизованих процесів діагностування.

Перші автоматизовані установки «Урожай» було створено під керівництвом У. І. Кірси у співпраці з авіаконструкторською організацією. У 1983 р. внаслідок активної діяльності А.В. Колчина, В.І. Соловйова, П.М. Черейського, В.І. Беляєва, А.С. Дунаєва у співдружності з науково-дослідними інститутами та заводом «Точелектроприлад» (м. Київ) була

поставлена на виробництво електронна автоматизована діагностична установка КІ-13940. Установка оснащувалась великою кількістю датчиків, у тому числі віброакустичних, які забезпечували діагностування тракторів та інших машин із підвищеною у 2...3 рази продуктивністю. З-поміж вдалих електронних діагностичних засобів слід відзначити прилад ІМД-Ц, створений під керівництвом В. М. Ліфшиця, а також прилад ЕМДП [4, 6, 10].

Проведено теоретичні та експериментальні дослідження, що характеризують параметри технічного стану вузлів і агрегатів автотракторної техніки, їх допустимі та граничні значення.

Використання на практиці розроблених методів та засобів діагностування сільськогосподарської техніки значно підвищило ефективність її експлуатації. Досвід передових господарств щодо впровадження технічного діагностування тракторів дозволив знизити кількість капітальних ремонтів (КР) у 1,3...1,5 рази, а простої машинно-тракторних агрегатів з технічних причин скоротити у 2 рази.

Перехід до ринкової економіки країни призвів до третього етапу розвитку технічної діагностики. Гостра нестача фінансових коштів у сільгоспвиробників та підприємств технічного сервісу зажадала розробки та впровадження недорогих методів та засобів технічного діагностування сільськогосподарської техніки. Прикладами таких засобів є механотестер оцінки технічного стану форсунок, нагнітальних клапанів, плунжерних пар паливного насоса і аналізатор герметичності циліндрів двигунів, що розроблені С. А. Чечетом [6].

Створено пакет комп'ютерних програм для діагностування та управління технічним станом машин, спрямований на вирішення трьох проблем: створення універсальних алгоритмів технічного діагностування машин; визначення залишкового ресурсу вузлів та агрегатів; пошук несправностей машин за якісними ознаками.

В даний час організовано дрібносерійне виробництво нових модернізованих пересувних, переносних та стаціонарних діагностичних засобів. Сертифікації піддаються всі прилади, що випускаються. Одночасно з виробництвом налагоджено публікацію технологій технічного діагностування всього спектра техніки, що використовується в сільському господарстві. Інтенсивно ведуться розробка та виготовлення засобів оцінки технічної та екологічної безпеки техніки.

Поряд з цим, останніми роками, ведуться розробки щодо вдосконалення відомих методик та засобів діагностування тракторних дизелів.

В результаті активної роботи Щетиніна Н.В., Арженовського А.Г., Нікітченко С.Л., Казакова Д.В., Асатуряна С.В. розроблено методику та засоби, що реалізують можливість визначати значення кутового прискорення колінчастого валу через певні цикли роботи двигуна (проміжки часу) на всьому діапазоні частот обертання колінчастого валу. Отримані таким чином дані є основою для побудови регуляторної характеристики (без паливних показників) випробуваного двигуна. Так само було створено вимірювально-обчислювальний комплекс для визначення потужності дизельних двигунів з ГТН, розроблено методику та засоби для визначення дійсного приведенного моменту інерції двигуна [3, 4].

Широке застосування сучасних електронних систем діагностування техніки забезпечує своєчасне виявлення несправностей, на 25...30% підвищує працездатність машин та скорочує приблизно у 2 рази трудомісткість їх технічного обслуговування. Тому вдосконалення методів та засобів технічного діагностування є актуальним завданням.

## 1.2 Класифікація методів та засобів діагностування основних параметрів двигунів

Сучасні методи та засоби технічного діагностування машин дають можливість оцінки технічного стану значної частини систем і механізмів машин без або з частковим їх розбиранням, а також прогнозувати термін

служби окремих вузлів та агрегатів. Це дає можливість контролювати технічний стан техніки та знижує час її простою, забезпечуючи цим значне зниження експлуатаційних витрат. Своєчасне діагностування дозволяє скоротити витрату запасних частин і паливно-мастильних матеріалів (ПММ), оскільки виконуються тільки дійсно необхідні операції з ремонту та регулювання. Виявлені та усунені вчасно суттєві несправності в системах живлення, запалювання, агрегатах ходової частини та трансмісії допоможуть покращити паливно-економічні показники на 5...10%, підвищити потужність двигуна та в 2...3 рази підвищити екологічні показники під час роботи машини [1, 8].

Основними завданнями технічного діагностування є: контроль технічного стану щодо відповідності вимогам технічної документації; пошук причин відмови (несправності); збирання вихідних даних для прогнозування технічного стану; підтримка надійності машин.

Вплив діагностування машин на виконання сільськогосподарських робіт представлено на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Вплив технічного діагностування машин виконання сільськогосподарських робіт

### 1.3 Методики та засоби діагностування технічного стану циліндро-поршневої групи та систем паливо- та повітряподачі

Значною мірою ефективність роботи машинно-тракторного парку залежить від технічного стану двигунів внутрішнього згорання. За деякими типами машин на частку дизельних двигунів припадає до 50% відмов, а трудомісткість виконуваних робіт з їх усунення сягає 40% від загального часу.

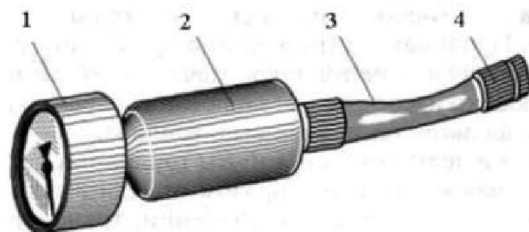
Аналізуючи роботу дизельних двигунів, можна сказати, що за надійністю, системи та механізми у двигуні розподіляються таким чином: система живлення – до 45% відмов; циліндро-поршнева група – до 20%; газорозподільний механізм – до 15%; системи охолодження та мащення – до 10% [14].

Основними зовнішніми ознаками несправності циліндро-поршневої групи (ЦПГ) і систем паливоподачі і подачі повітря є перевитрата оливи, утруднений пуск дизеля і нестійка робота, зниження потужності та економічності.

Імовірними причинами цих проявів, згідно з [1, 8] можуть бути: зниження тиску наддуву турбокомпресора; знос ЦПГ; неякісна робота форсунок; неправильне встановлення кута початку подачі палива; несправності паливного насоса високого тиску (ПНВТ).

Таким чином, своєчасне та якісне діагностування технічного стану циліндро-поршневої групи та системи паливоподачі дозволить забезпечити високу технічну готовність техніки та виконання технологічних процесів у задані терміни, скоротити експлуатаційні витрати, підвищити ефективність діяльності сільськогосподарських підприємств.

Визначення тиску наддувного повітря проводиться за допомогою пристрою КІ-28095 (рис. 1.2).



1 – манометр; 2 – корпус; 3 – з'єднувальний шланг; 4 – сполучний штуцер

Рисунок 1.2 – Пристрій КІ-28095

Для перевірки технічного стану турбокомпресора необхідно:

– з різьбового отвору в колекторі нагнітального турбокомпресора вивернути пробку і замість неї ввернути штуцер приладу;

– запустити двигун;

– встановити номінальну частоту обертання колінчастого валу двигуна та зафіксувати за манометром значення тиску наддуву;

– проаналізувати виміряне значення тиску наддуву (при працездатному стані турбокомпресора тиск наддуву має бути не менше 0,35 кгс/см<sup>2</sup>; номінальний тиск наддуву – 0,5...0,6 кгс/см<sup>2</sup>);

– перевірити роботу турбокомпресора. Для цього двигуну дати попрацювати 3...5 хв при мінімальній частоті обертання колінчастого валу, встановити максимальний швидкісний режим і зупинити двигун, вимкнувши подачу палива. При справному турбокомпресорі обертання ротора повинно прослуховуватись протягом не менше 5 секунд після зупинки;

– якщо після зупинки двигуна не чути обертання ротора, перевірити легкість його обертання. Для цього, відкривши доступ до колеса компресора, повертати колесо рукою, вибираючи осьовий зазор спочатку в один бік, потім в інший. Колесо компресора повинно легко обертатися без зусилля, заїдання і зачеплення за нерухомі частини турбокомпресора.

*Перевірка ефективної потужності двигуна.* Діагностування потужносних показників дизельного двигуна зводиться до визначення його потужності та порівняння отриманого значення з гранично допустимим.

Для визначення потужності існують гальмівні, безгальмівні та парціальні методи [14].

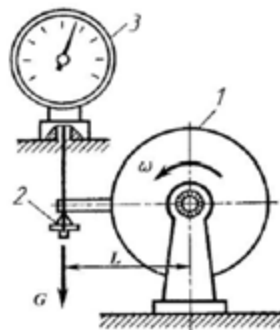
Визначення потужності двигунів гальмівними методами полягає в тому, що до колінчастого валу двигуна за допомогою гальмівних установок (рис. 1.3) прикладають необхідний момент опору, що перешкоджає його обертанню.

Найбільший інтерес для визначення енергетичних параметрів двигуна представляє його навантажувальна (регуляторна) характеристика.

Процес отримання регуляторної характеристики вимагає проведення досліджень із поступовим збільшенням навантаження двигуна від холостого ходу до максимальної потужності, а потім – до отримання максимального крутного моменту.

Процес отримання навантажувальної характеристики полягає в наступному: навантажують двигун до заданого режиму, і підтримують навантаження на рівні постійного до закінчення дослідження; визначають потужність та питому витрату палива; встановлюють нове навантаження та проводять дослідження у тому ж порядку.

До протоколу випробувань вносяться всі результати.



1 – гальмо; 2 – призма; 3 – ваговий механізм.

Рисунок 1.3 – Схема балансирного динамометра для вимірювання крутного моменту двигуна

Визначення крутного моменту двигуна ведеться за відомою формулою:

$$M_e = GL, \quad (1.1)$$

де  $G$  – зусилля, що визначається ваговим механізмом, Н;  $L$  – плече, м.

Потужність двигуна визначається за формулою:

$$N_e = M_e \omega, \quad (1.2)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість валу, рад/с.

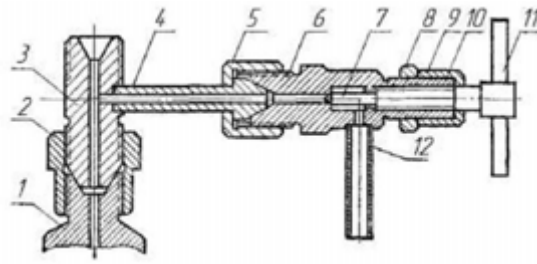
В залежності від типу навантажувального пристрою, гальмівні установки можуть бути механічні, повітряні (пневматичні), гідравлічні та електричні [2, 3, 7].

Результати, що отримані гальмівними методами, є більш точними, але вимагають значних витрат на придбання гальмівних установок, а також на підготовку та проведення випробувань.

*Діагностування потужності дизелів методом Н.С. Ждановського.* Для визначення енергетичних показників роботи двигунів існують також безгальмівні методи. Одним із таких методів є розроблений Н.С. Ждановським спосіб визначення потужності. В якості навантаження для працюючих циліндрів використовуються механічні втрати від вимкнених циліндрів. Потужність визначається за частотою обертання колінчастого валу двигуна в режимі навантаження тільки для працюючих циліндрів.

Випробування проводять у наступному порядку: запустити та прогріти дизель (температура охолоджуючої рідини 80...90°C); збільшуючи подачу палива, визначають частоту обертання колінчастого валу при роботі на одному циліндрі; повторюють вимірювання окремо для кожного циліндра двигуна. Відключення подачі палива у циліндри здійснюється за допомогою вимикачів подачі палива (рис. 1.4).

Якщо двигун не працює на одному циліндрі, його потужність менше 80%.



1 – штуцер секції паливного насоса; 2 – накидна гайка вимикача циліндра; 3 – штуцер вимикача циліндра; 4 – зливна трубка; 5 – накидна гайка; 6 – трійник; 7 – запірна голка; 8 – контргайка; 9 – гайка; 10 – ущільнення; 11 – рукоятка; 12 – трубка.

Рисунок 1.4 – Вимикач подачі палива

Даний метод можна застосовувати лише для 4-х циліндрових двигунів. Також до недоліків даного методу відноситься невисока точність, проте низька трудомісткість визначення потужності даним методом є основною його перевагою.

Подальшим розвитком цього методу є застосування додаткового довантаження дизеля разом із відключенням циліндрів. Додаткові пристрої, що застосовуються, дозволяють використовувати з метою завантаження працюючих циліндрів додатковий опір, утворений для досягнення заданого режиму роботи в системах самого трактора.

*Діагностування потужності дизелів за ефективною витратою палива.* Розроблений спосіб оцінки економічності та визначення потужності дизелів за ефективною витратою палива, що заснований на визначенні різниці між максимальною витратою палива та витратою на холостому ході [3, 4, 7].

Аналіз характеру зміни витрати палива, в залежності від потужності, виражається такою формулою [4, 5]:

$$G_{mN} = G_{mx} + bN_{e\max}^a, \quad (1.3)$$

де  $G_{mN}$  – витрата палива при максимальній потужності, кг/год;  $G_{mx}$  – витрата палива на холостому ході, кг/год;  $N_{e\max}^a$  – максимальна потужність

двигуна, кВт;  $b$  – характеризує нахил кривої, емпіричний коефіцієнт;  $a$  – критерій, що характеризує кривизну, безрозмірний коефіцієнт.

Значення коефіцієнтів  $a$  та  $b$  визначають шляхом статистичної обробки результатів контрольних випробувань. Для однотипних дизелів вони незмінні.

Отже, для визначення потужності за цим методом необхідно заміряти витрату палива на холостому ході та максимальну витрату палива. Для виконання цього завдання використовують витратомір КІ-8940 (рис. 1.5).

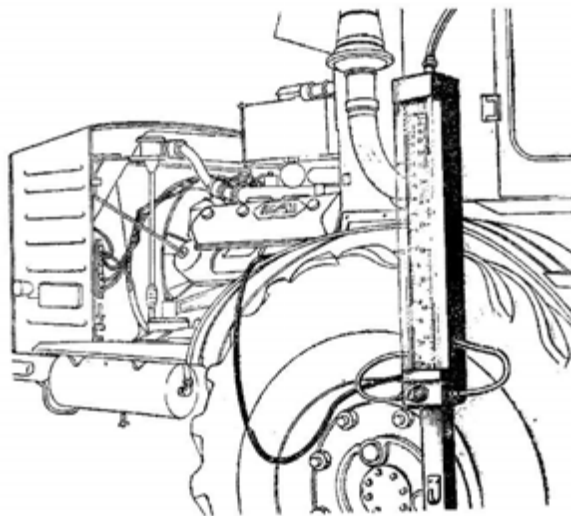


Рисунок 1.5 – Витратомір КІ-8940

Витратомір використовує залежність перепаду тиску в звуженому отворі діафрагми від витрати палива.

Зменшуючи кількість всмоктуваного повітря імітатором навантаження КІ-5653 (рис. 1.6), моделюється навантаження на сам двигун.

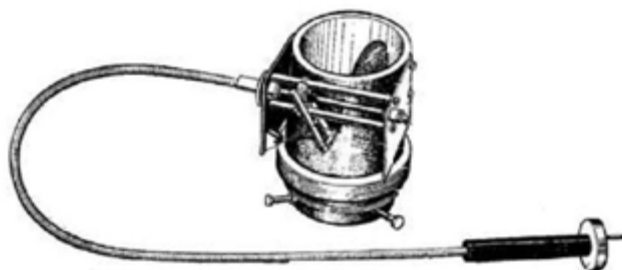


Рисунок 1.6 – Імітатор навантаження КІ-5653

Імітація навантаження відбувається в такий спосіб. Подача повітря в циліндри зменшується, частота обертання колінчастого валу падає, під дією всережимного регулятора подача палива збільшується.

Недоліком даного способу є можливість визначення тільки максимального значення потужності і відповідного значення витрати палива, а значення тиску наддуву, що отримане вищеописаним способом, не завжди відповідає максимально можливому для турбокомпресору, що розглядається.

*Діагностування енергетичних параметрів методом, розробленим в АЧДП.* Взявши за основу описані вище закономірності, АЧДП запропоновано пристрій (рис. 1.7) і методика для визначення значення кутового прискорення на всьому діапазоні частот обертання колінчастого валу двигуна. З отриманих даних є можливість побудови регуляторної характеристики (без годинної і питомої витрат палива) досліджуваного двигуна [13].

Ця методика полягає в наступному. У працюючого на мінімальній частоті обертання колінчастого валу двигуна різко збільшують подачу палива до максимальної. Зуби вінця маховика наводять у котушці датчика 1 імпульси з частотою, що пропорційна до частоти обертання колінчастого валу.

Імпульси від нього надходять в блок виділення циклів 2, а за допомогою блоку управління 3 і блоку розрахунку часу 4 визначається тривалість кожного виділеного циклу.

В обчислювальному пристрої 5 обчислюються середні значення кутової швидкості та прискорення колінчастого валу по циклах, що надходять на пристрій виведення результатів 6.

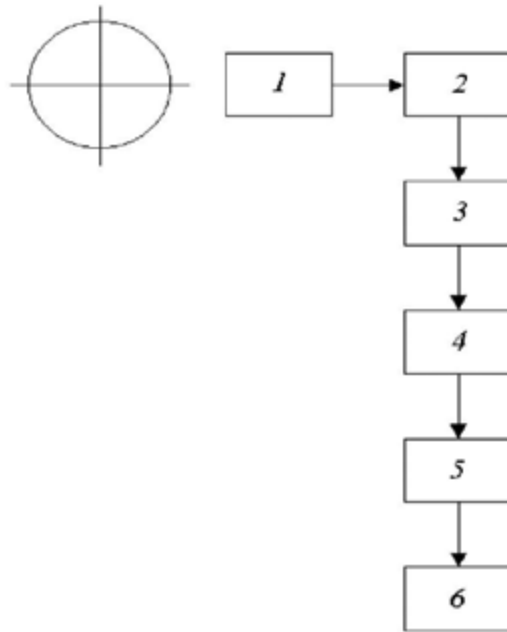
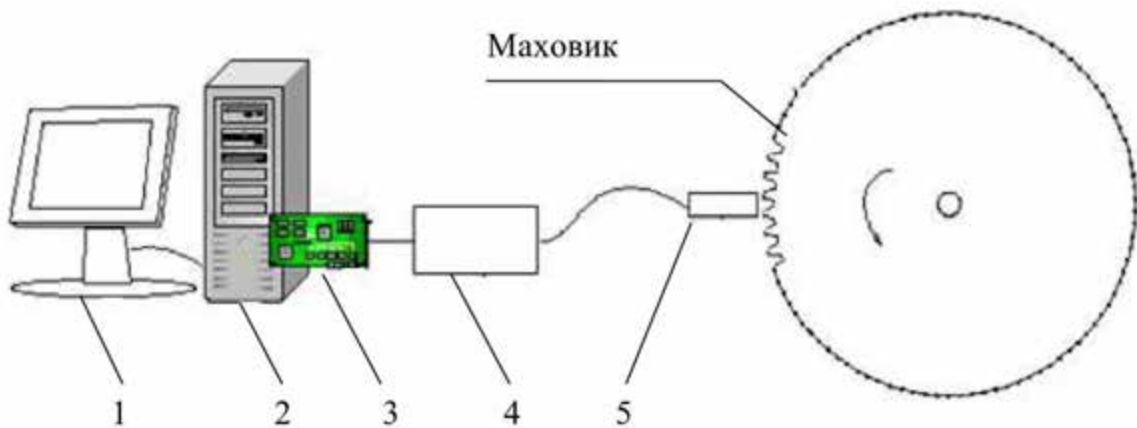


Рисунок 1.7 – Блок-схема пристрою для вимірювання значень кутового прискорення колінчастого валу



1, 2 – ПК; 3 – АЦП; 4 – плата сполучення; 5 – датчик

Рисунок 1.8 – Вимірювально-обчислювальний комплекс

Вимірювально-обчислювальний комплекс, розроблений в АЧДП, складається з ПК, плати аналого-цифрового перетворення, плати сполучень та датчика (індукційного), що встановлюється навпроти зубів маховика колінчастого валу (рис. 1.8).

Енергетичні показники визначаються у 2 етапи:

- Запис процесу розгону колінчастого валу двигуна.
- Обробка даних.

Дійсний момент інерції конкретного двигуна визначається за способом, розробленим і запатентованим АЧДП.

Суть цього методу полягає в наступному. Спеціально розроблений пристрій – «маховик» (рис. 1.9), момент інерції якого відомий, з'єднується з досліджуваним двигуном за допомогою валу відбору потужності (ВОМ).

Досліджуваний двигун послідовно розганяється без «маховика» і з «маховиком», реєструються параметри обертання колінчастого валу двигуна та визначаються відповідні значення кутового прискорення колінчастого валу на номінальному режимі. Потім визначається дійсний приведений момент інерції двигуна.



Рисунок 1.9 – Пристрій визначення дійсного моменту інерції двигуна  
*Перевірка технічного стану форсунок.* Основними показниками, що характеризують працездатність форсунки, є тиск початку впорскування палива, якість розпилювання палива та герметичність запірною конуса голки розпилювача.

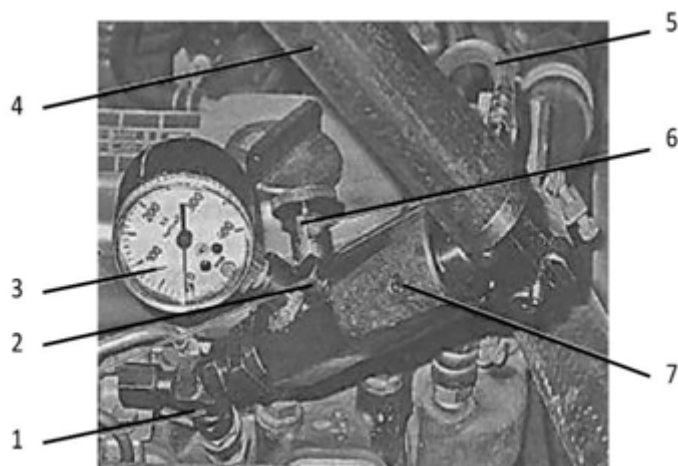
Основні зовнішні ознаки несправності форсунок – «чорний вихлоп» відпрацьованих газів і нерівномірність роботи двигуна.

На двигуні, що працює, несправну форсунку можна визначити, почергово послаблюючи накидні гайки кріплення паливопроводів високого тиску до штуцерів секцій насоса і спостерігаючи за частотою обертання

колінчастого валу. Якщо частота не змінюється, форсунка несправна. У разі відключення справної форсунки частота обертання зменшиться.

Для встановлення причин неякісної роботи форсунки використовують механотестер КІ-5918 (рис. 1.10) [6].

При підготовці механотестера до роботи вивертають пробку зверху біля ручки 4, наливають у внутрішню порожнину ручки дизельне паливо і завертають пробку. Відвертають пробку 2 і виконують кілька робочих переміщень рукоятки 4 вгору-вниз до моменту повного припинення виділення зі штуцера бульбашок повітря. Завертають пробку 2 та вентиль дроселя 6.



1 – перехідник зі штуцером; 2 – пробка; 3 – манометр; 4 – рукоятка; 5 – трубопровід; 6 – дросель; 7 – корпус

Рисунок 1.10 – Механотестер КІ-5918 під час перевірки форсунки

Навертають на штуцер спеціальну пробку-заглушку (входить у комплект) і, виконуючи робочі переміщення рукоятки, забезпечують у порожнині нагнітання тестера тиск 17...20 МПа. Тривалість падіння тиску має бути не менше 45 секунд.

Від'єднують паливопровід високого тиску від форсунки або секції паливного насоса (з огляду на зручність підключення тестера) і приєднують механотестер за допомогою перехідника до штуцера форсунки або паливопроводу.

Для перевірки якості розпилювання палива кілька разів плавно переміщують рукоятку до моменту початку нагнітання палива (тиск в порожнині нагнітання має бути 8...10 МПа) і різко переміщують рукоятку тестера на шляху активного ходу плунжера, що залишився. Якщо звук упорскування прослуховується слабо і не має яскраво вираженого відтінку, характерного для справного розпилювача, форсунку розбирають і очищають від відкладень.

У справної форсунки впорскування повинне супроводжуватися чітким, добре прослуховуваним уривчастим звуком високого тону. Для кращого прослуховування можна скористатися автостетоскопом.

Для оцінки герметичності за замикаючим конусом виконують рукояткою тестера кілька робочих рухів, забезпечивши в порожнині нагнітання тестера тиск на 1,0...1,5 МПа менше номінального значення тиску початку впорскування палива форсункою.

Визначають герметичність запірного конуса голки розпилювача, для чого за секундоміром визначають час падіння тиску в інтервалі 15...10 МПа, що має бути не менше 15 секунд.

Для вимірювання тиску початку впорскування палива виконують рукояткою тестера кілька робочих рухів, наповнивши канали форсунки паливом, і, спостерігаючи за стрілкою манометра, фіксують момент максимального її відхилення. Цей момент відповідає тиску початку впорскування палива форсункою.

Тиск початку впорскування має відповідати значенням, наведеним у технічній документації. За їх невідповідності форсунку регулюють.

Для більш точної діагностики, регулювання та візуального спостереження якості розпилу форсунки використовують прилади типу КІ-562 (рис. 1.11) або їх аналоги. Для цього форсунки демонтують із дизеля, промивають і приступають до перевірки.

Методика діагностування полягає в наступному:

– Демонтувати форсунки з двигуна, очистити від нагару.

- Промити та закріпити форсунку на приладі КІ-562 (рис. 1.11).
- Налаштувати форсунку на потрібний тиск упрорскування.
- Візуально визначити якість розпилу палива. Якщо робота форсунки не відповідає вимогам, необхідно замінити розпилювач.



Рисунок 1.11 – Прилад КІ-562

У сучасних стендах діагностування форсунок (рис. 1.12) манометри аналогового типу замінені на електронні, що дозволяє точніше регулювати тиск початку впорскування палива форсункою.



Рисунок 1.12 – Сучасні стенди діагностування форсунок

*Перевірка технічного стану плунжерних пар та нагнітальних клапанів ПНВТ.* Оцінку гідрощільності нагнітального клапана виконують для всіх типів паливних насосів високого тиску.

Від'єднують паливопровід високого тиску від штуцера паливного насоса та приєднують до нього за допомогою перехідника механотестер КІ-16301 (рис. 1.12). Важіль керування регулятором паливного насоса переводять у положення вимкненої подачі палива [6].

Виконують рукояткою тестера кілька плавних робочих рухів, забезпечивши в порожнині нагнітання механотестера тиск 18...20 МПа.

Визначають за секундоміром час падіння тиску в інтервалі 15...10 МПа. Час падіння тиску має бути не менше 10 секунд. В іншому випадку підтягують штуцер нагнітального клапана і знову оцінюють його гідрощільність. Якщо під час повторної перевірки результати збігаються, клапан замінюють.

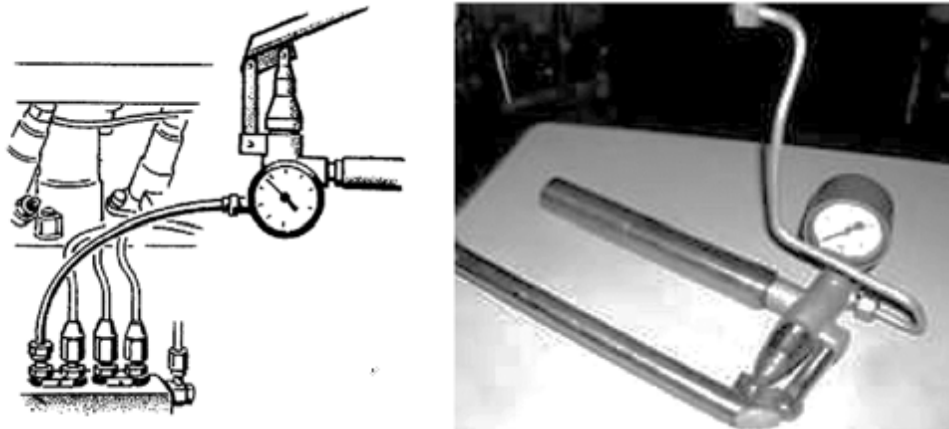


Рисунок 1.13 – Механотестер КІ-16301

Для перевірки плунжерних пар від'єднують паливопровід високого тиску від штуцера паливного насоса та включають подачу палива.

Для рядних і V-подібних насосів додатково вивертають штуцер і послідовно видаляють з насосної секції, що перевіряється, пружину і запірний елемент нагнітального клапана.

Провертаючи колінчастий вал вручну, домагаються переміщення плунжерної пари, що перевіряється, в середнє положення.

Приєднують механотестер до штуцера паливного насоса та виконують рукояткою плавні рухи, забезпечуючи тиск палива у секції 25 МПа.

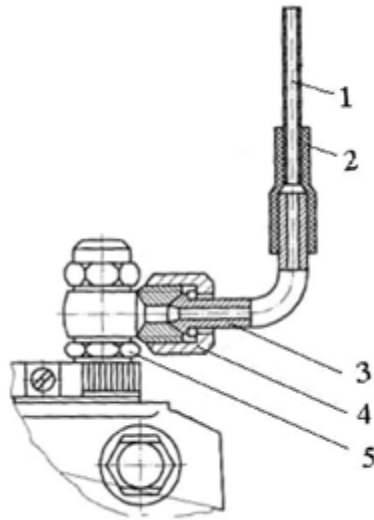
Визначають за секундоміром час, за який тиск падає від 20 до 15 МПа. Якщо даний час менше 15 секунд, то насос підлягає ремонту

*Перевірка кута випередження подачі палива.* Найбільш ефективно згоряння палива в циліндрах дизеля відбувається при впорскуванні його до приходу поршня в ВМТ. У процесі експлуатації, внаслідок зношування деталей паливного насоса, кут випередження подачі палива змінюється у бік запізнення. В результаті зростає кількість палива, що згоряє під час розширення газів у циліндрах двигуна, тобто відбувається догоряння на такті розширення, що призводить до підвищення температури відпрацьованих газів і порушення теплового режиму роботи двигуна [6].

Для визначення кута випередження подачі палива плунжерною парою насоса високого тиску використовують кутомір КІ-13926 та моментоскоп КІ-4941 (рис. 1.14). Послідовність операцій наступна:

- від'єднати паливопровід від штуцера першої секції ПНВТ;
- вивернути штуцер із насоса, дістати пружину та встановити на її місце технологічну, яка входить у комплект моментоскопу КІ-4941 (якщо плунжерні пари мають напрацювання менше 1000 мото·год, технологічну пружину не встановлюють);
- повернути штуцер на місце та закріпити на ньому за допомогою накидної гайки моментоскоп (рис. 1.14);
- у решти секцій послабити накидні гайки паливопроводів;
- встановити важіль ручного керування регулятором у положення максимальної подачі палива;
- повернути пусковим пристроєм колінчастий вал до появи зі скляної трубки моментоскопа суцільного струменя палива без бульбашок повітря та піни;

– за допомогою кутоміра та настановної шпильки, що входить у поглиблення на маховику, визначити кут випередження подачі палива та порівняти його значення з довідниковими даними.



1 – трубка зі скла; 2 – трубка сполучна; 3 – відрізок паливопроводу; 4 – гайка; 5 – штуцер.

Рисунок 1.14 – Встановлення моментоскопу на ПНВТ

#### 1.4 Визначення основних параметрів двигунів діагностичними комплексами

В даний час на ринку діагностування тракторів є величезна кількість сучасних засобів діагностування, які поділяються на зовнішні та вбудовані [1, 4, 5, 8].

Системи технічного діагностування (СТД), що входять у конструкцію досліджуваної техніки, є вбудованими (бортовими), а ті, що не входять, називаються зовнішніми. Зовнішні СТД бувають переносними та стаціонарними, а за своїми функціональними можливостями діляться на мотор-тестери, системні тестери та сканери.

Сканери дещо обмежені у своїх можливостях, хоча дешевші.

Вони дозволяють проводити регулювання холостого ходу, діагностувати форсунки та ін. Для роботи зі сканером потрібен досвідчений

фахівець – діагност, який зможе правильно оцінювати інформацію, що видається сканером.

Системний тестер є пристроєм зчитування бортової інформації досліджуваної машини через діагностичний роз'єм і служить для діагностування електронних систем.



Рисунок 1.15 – Сканер DST-2M зі змінними картриджами та адаптером

В системному тестері використовується значно більше даних для діагностування різних систем, ніж у сканері, а також є можливість оновлювати ці дані.

Системні тестери фірми Bosch, що широко використовуються на ремонтних підприємствах, дозволяють якісно діагностувати значну частину техніки, що застосовується в сільському господарстві [1].

Ще більше можливостей спеціалізованих системних тестерів (рис. 1.16), призначених для діагностування техніки певного виробника. Вони застосовуються дилерськими технічними сервісами. Висока ціна, дороге навчання персоналу, спеціалізація на техніці одного виробника та придбання тільки дилером є значними чинниками щодо їх малого поширення.



Рисунок 1.16 – Спеціалізований системний тестер для діагностування мобільної техніки фірми JohnDeere.

Мотортестери (рис. 1.17) використовуються для комплексного діагностування тракторів, двигунів та їх систем. Залежно від комплектації, змінюються і можливості мотортестерів.

До складу мотортестера зазвичай входить ПК, комплект датчиків і група кабелів для тестування. У пам'яті є інформація з технічною характеристикою техніки, що діагностується. За відсутності інформації щодо досліджуваного двигуна, можна вносити дані в ручному режимі.

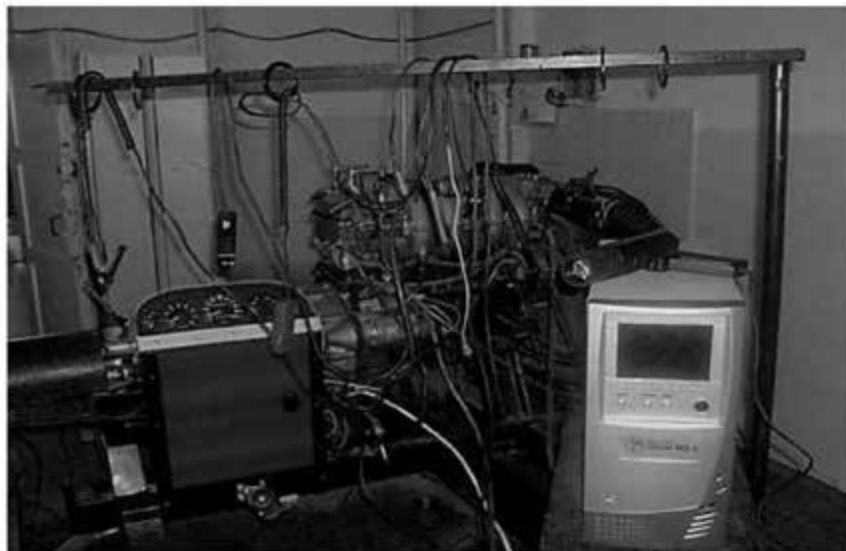


Рисунок 1.17 – Мотортестер М 3-2 у роботі

Мотортестер М 3-2 призначений для оцінки технічного стану двигунів внутрішнього згоряння. До складу приладу входять датчики: початку відліку, сили струму, напруги та стробоскоп.

У пам'яті комп'ютера для обчислення ефективної потужності двигуна є значення приблизних коефіцієнтів умовних моментів інерції.

Є можливість вносити показники у ручному режимі. За результатами діагностування видається діагностична карта оцінки стану двигуна (мінімальні оберти холостого ходу, ефективна потужність, нерівномірність роботи), системи упорскування, системи пуску та системи запалювання.

Недоліком мотортестера є неможливість використання двигунів з турбонаддувом, для двигунів з невідомим моментом інерції та ефективної потужністю, і навіть неможливість визначення паливно-економічних показників.

Комплекс автомобільної діагностики КАД-300 (рис. 1.18) служить для оцінки технічного стану бензинових двигунів з усіма видами систем запалювання, а також проведення діагностування систем упорскування палива дизелів та їх електрообладнання на станціях технічного обслуговування.



Рисунок 1.18 – Комплекс діагностики КАД-300

Параметри роботи дизельного двигуна, що отримуються за допомогою КАД-300: визначення мінімальної та максимальної частот обертання колінчастого валу двигуна; оцінка роботи автоматичної муфти випередження упорскування; перевірка настановного кута випередження упорскування палива; стан АКБ.

Недоліками КАД-300 є: орієнтованість на автотранспорт, стаціонарне виконання (необхідність діагностичного боксу) та відсутність можливості визначення паливно-економічних показників.

Наразі виробництво продукції серії КАД припинено.

## РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ДІАГНОСТУВАННЯ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ

### 2.1 Програма теоретичних досліджень

Програма теоретичного дослідження базується на необхідності розв'язання задач і складається з таких пунктів:

1. Обґрунтування послідовності операцій за принципом проектування технології діагностування.

2. Удосконалення існуючих методик діагностування технічного стану турбокомпресора, циліндро-поршневої групи (ЦПГ) та системи паливоподачі дизельних двигунів з ГТН та розробка на їх основі методики комплексної діагностики дизельних двигунів.

3. Обґрунтування структури та комплектування діагностичного комплексу.

### 2.2 Принципи проектування технології діагностування

Системний підхід до розробки технології діагностування машин за вихідний принцип приймає врахування специфіки стану конкретної машини та високу якість перевірки за мінімальної трудомісткості. В результаті такого системного підходу створюється гнучка універсальна технологія, що відображає все можливе різноманіття ситуацій і враховує кожен результат попередньої операції перевірки [7].

Технічне діагностування організують так, щоб з мінімальними витратами праці вирішити наступні завдання [9]: перевірити певну сукупність параметрів та якісних ознак технічного стану машини та прийняти рішення про необхідність відновлення до номінального значення тих параметрів, які вийшли за межі, що допускаються; при усуненні наслідків відмови машини перевірити правильність функціонування, знайти несправність та ухвалити рішення про відновлення працездатності машини; після досягнення машиною доремонтного або післяремонтного напрацювання перевірити працездатність та правильність функціонування,

отримати інформацію для прогнозування залишкового ресурсу та за необхідності підготувати (ухвалити) рішення щодо відновлення ресурсу машини або її складових частин; при ремонті визначити необхідність повного розбирання та проведення капітального ремонту вузлів та агрегатів (передремонтне діагностування), оцінити якість ремонту машин та агрегатів (післяремонтне).

Основними чинниками, які впливають на вартість діагностування, є тривалість чи трудомісткість цього процесу, балансова вартість технічних засобів, і навіть їх річний фонд робочого дня [2].

Зважаючи на це, наше дослідження має на меті виконання такої умови:

$$T_{\text{діагн}}, B_{\text{обор}} \rightarrow \min, \quad (2.1)$$

де  $T_{\text{діагн}}$  – трудомісткість діагностування, люд·год;  $B_{\text{обор}}$  – балансова вартість діагностичного обладнання, грн.

Зменшити трудомісткість діагностики і тим самим підвищити продуктивність діагностичних засобів можна за допомогою заходів, наведених на рис. 2.1



Рисунок 2.1 – Основні шляхи скорочення трудомісткості діагностування

### 2.3 Послідовність технології діагностування

Системний підхід передбачає строгу послідовність у розробці технології діагностування. Послідовність операцій вибирається з принципу мінімуму витрат часу на встановлення причини несправності.

Процес діагностування включає три основні етапи [12]:

1. підготовчий ( $T_n$ );
2. основний ( $T_o$ );
3. заключний ( $T_z$ ).

Таким чином, трудомісткість діагностування у загальному вигляді можна визначити з урахуванням її складових за формулою:

$$T_{\text{diag}} = T_n + T_o + T_z. \quad (2.2)$$

Робота підготовчого етапу залежить від цілей діагностики. Так, для діагностування при ТО-3 виконують повний об'єм робіт і складають зразковий план регламентованих робіт. При заявковому діагностуванні ці роботи стосуються лише несправного агрегату.

Підготовчий етап включає [9]:

- отримання даних від тракториста про технічний стан вузлів, систем та агрегатів;
- перегляд документів про робочий час або витрату палива тощо;
- складання плану попередньої діагностики;
- проведення зовнішнього огляду підтікання палива, оливи, електроліту, охолоджувальної та гальмівної рідин, стану кріплень тощо;
- встановлення діагностичного обладнання та підключення датчиків;
- прогрів двигуна.

На основному етапі задають необхідні режими двигуна та іншим агрегатам, вимірюють, згідно з попереднім та послідовно уточненим планом, діагностичні параметри, аналізують стан агрегатів і проводять додаткові поглиблені перевірки. Послідовно визначають потребу двигуна та інших агрегатів у ремонті, усуненні несправностей, складних регулюваннях та інших запобіжних операціях.

До основного етапу належать:

- виведення двигуна на потрібні режими;
- оцінка якісних ознак несправностей у процесі роботи трактора: вібрація, биття деталей, що обертаються, нагрівання корпусних деталей, шум, специфічний запах тощо;
- інструментальне діагностування за узагальненими параметрами технічного стану агрегатів;
- інструментальне діагностування за частинними параметрами технічного стану агрегатів для виявлення несправностей.

На заключному етапі знімають з машини діагностичні засоби, проводять складні регулювання, по можливості усувають виявлені несправності, аналізують стан машини та дають рекомендації щодо ремонтно-обслуговуючих робіт.

До заключного етапу належать:

- згортання діагностичного обладнання та підключених датчиків;
- проведення складних регулювань, по можливості усунення виявлених несправностей;
- визначення залишкового ресурсу складових частин агрегатів, що діагностуються;
- складання рекомендацій про вид та об'єм необхідних ремонтно-обслуговуючих робіт на основі проведеного технічного діагностування;
- заповнення діагностичної картки з рекомендаціями щодо ремонтно-обслуговуючих робіт, яка надалі служить основним документом для проведення ремонтно-обслуговуючих робіт, у тому числі видачі запасних частин та ремонтних матеріалів.

Крім цього, при розробці технологій діагностування необхідно встановити трудомісткості окремих контрольних робіт і повного діагностування:

$$T_{\text{диагн}} = \sum t_i, \quad (2.3)$$

де  $t_i$  – трудомісткості відповідних діагностичних операцій, люд·год.

Відповідно до п. 1.3, справність дизельного двигуна більшою мірою залежить від технічного стану циліндро-поршневої групи (ЦПГ) та систем паливоподачі та подачі повітря. На їхню частку припадає до 65% відмов та несправностей.

Ми пропонуємо методику комплексної діагностики дизелів, що полягає в послідовній реалізації нижчеперелічених частинних методик діагностування ЦПГ і систем паливоподачі і подачі повітря:

1. Встановлення залежності зміни тиску наддуву (для двигунів з ГТН) від частоти обертання колінчастого валу двигуна.

2. Виявлення залежності зміни енергетичних параметрів двигуна ( $M_k = f(n)$  і  $N_e = f(n)$ ).

3. Дослідження нерівномірності роботи циліндрів двигуна (за потужністю).

4. Виявлення залежності зміни тиску у паливопроводах високого тиску, що дозволяють оцінити технічний стан форсунок та ПНВТ.

5. Діагностування кута випередження подачі палива.

6. Встановлення залежності зміни кута випередження впорскування палива від частоти обертання колінчастого валу дизельних двигунів.

Таким чином, трудомісткість комплексного діагностування дизельних двигунів за пропонованою методикою дорівнює:

$$T_{\text{діагн}} = t_{\text{ГТН}} + t_{\text{ен.пок}} + t_{\text{нерівн}} + t_{\text{сист.живл}} + t_{\text{УОПТ}} + t_{\text{АМОВТ}}, \quad (2.4)$$

де  $t_{\text{ГТН}}$  – трудомісткість діагностування ГТН, люд·год;  $t_{\text{ен.пок}}$  – трудомісткість діагностування енергетичних показників, люд·год;  $t_{\text{нерівн}}$  – трудомісткість діагностування нерівномірності роботи двигуна по циліндрах, люд·год;  $t_{\text{сист.живл}}$  – трудомісткість діагностування агрегатів системи живлення, люд·год;  $t_{\text{УОПТ}}$  – трудомісткість діагностування УОПТ, люд·год;  $t_{\text{АМОВТ}}$  – трудомісткість діагностування АМОВТ, люд·год.

## 2.4 Діагностичний комплекс

Для реалізації запропонованої методики було скомплектовано діагностичний комплекс (рис. 2.2, 2.3) на основі ПК.

Для діагностики дизельного двигуна необхідно обробити масив даних, отриманих від різних вузлів. Масив даних формується за допомогою аналогово-цифрового перетворювача 2, плати сполучення 3, двох індукційних датчиків 4 і 5, датчика тиску 6 у паливопроводі і перетворювача надлишкового тиску у впускному колекторі 7. Датчик 4 використовується для отримання кутового прискорення колінчастого валу, на підставі якого визначається ефективна потужність дизеля. Датчик 5 використовується для визначення кута випередження упорскування палива та стану муфти випередження упорскування палива (за наявності). Датчик 6 фіксує значення тиску в паливопроводі на підставі яких дається висновок про стан плунжерних пар, нагнітальних клапанів, паливних форсунок та інших вузлів системи живлення високого тиску. Перетворювач надлишкового тиску в впускному колекторі 7 використовується для визначення стану системи впуску та турбокомпресора (за наявності).

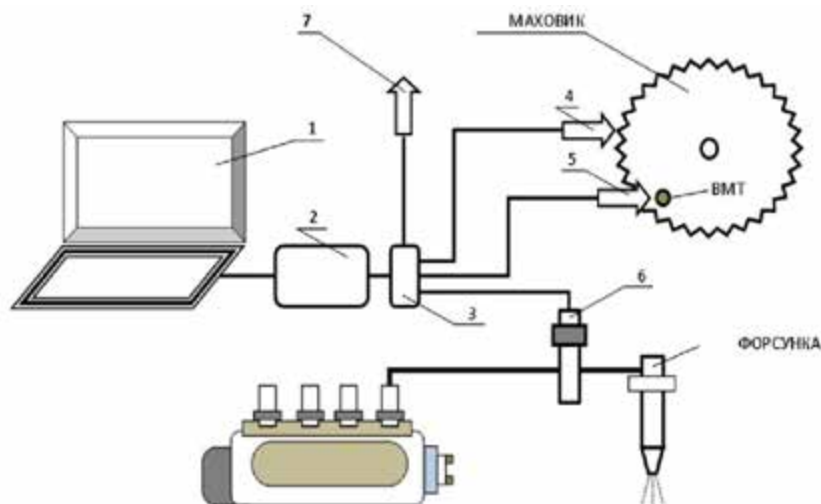


Рисунок 2.2 – Схема пропонуваного діагностичного комплексу

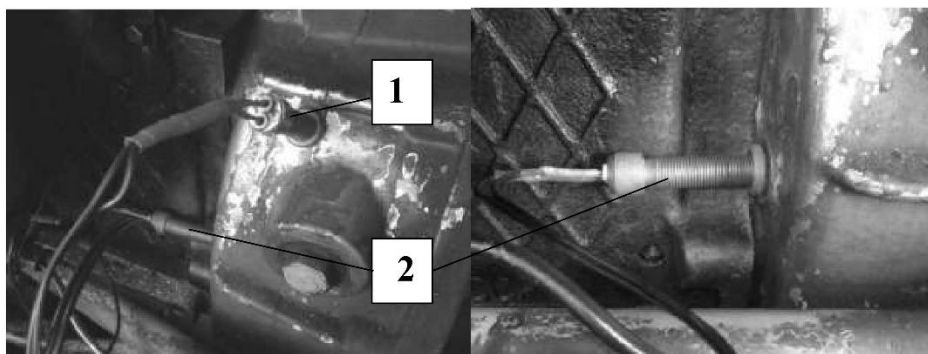


Рисунок 2.3 – Діагностичний комплекс підготовлений до роботи

Для отримання сигналу використовуються два індукційні датчики (рис. 2.4). Індукційний датчик 1 встановлюється в спеціально підготовлений отвір М16х1,5 в картері маховика, навпроти зубчастого вінця маховика колінчастого валу на відстані 1...3 мм від вершин зубів. При проходженні зубів вінця маховика перед ним, у датчику генерується ЕРС, частота якої пропорційна швидкості проходження зубів вінця маховика.

У маховику колінчастого валу більшості тракторів є механічний фіксатор (настановна шпилька), для визначення положення першого циліндра двигуна у верхній мертвій точці (ВМТ).

Технологічний отвір цього пристрою використовується для установки індукційного датчика 2 фіксації положення поршня першого циліндра в ВМТ (рис. 2.4).



1 – датчик частоти обертання маховика; 2 – датчик фіксації ВМТ

Рисунок 2.4 – Встановлення індукційного датчика на двигун А-41

Для спрощення робіт по встановленню датчика положення ВМТ на двигуні СМД-62 використовується попередньо підготовлений, технологічний отвір діаметром 8 мм. Цей отвір робиться поруч із міткою, що відповідає положенню першого циліндра в ВМТ – 1 (рис. 2.5). Навпроти мітки на кришці верхнього вікна картера маховика встановлюється індукційний датчик ВМТ – 2.



Рисунок 2.5 – Встановлення датчика ВМТ на СМД-62

Для вимірювання тиску у паливопроводі (рис. 2.6) використовується датчик тиску, який встановлюється між форсункою першого циліндра двигуна та паливопроводом.



Рисунок 2.6 – Встановлення датчика тиску в паливопроводі

Вимірювання тиску наддуву повітря для двигунів з газотурбінним нагнітачем (ГТН) проводиться за допомогою датчика тиску, який встановлюється у впускному колекторі (рис 2.7).



Рисунок 2.7 – Датчик тиску ПД100-Д10.1 та спосіб його встановлення на двигун СМД-62

Для визначення дійсного моменту інерції двигуна використовується пристрій «маховик» з відомим моментом інерції, що входить до структури діагностичного комплексу (рис. 2.8). Даний пристрій з'єднується з трактором, що досліджується, через вал відбору потужності (ВВП).

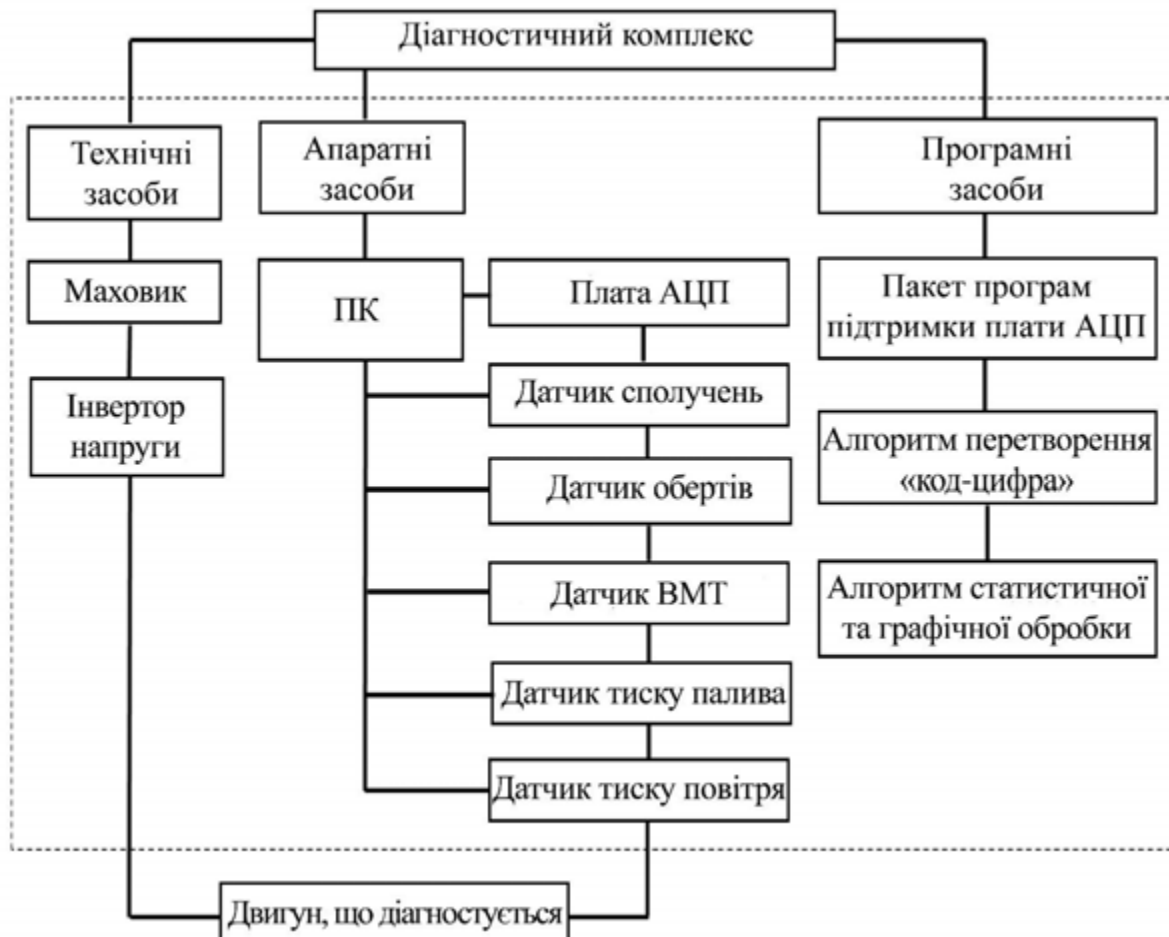


Рисунок 2.8 – Структурна схема діагностичного комплексу

Під час проведення досліджень використовуються індукційні датчики та датчики тиску, які з'єднуються з комп'ютером екранованими коаксіальними провідниками.

Для обробки сигналів датчиків використовують аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) L-Card E-154 (рис. 2.9) з пакетом відповідних програм LGraphII.



Рисунок 2.9 – АЦП L-Card E-154

Для забезпечення передачі сигналів від датчиків до аналого-цифрового перетворювача до складу пропонованого комплексу введена плата сполучення (рис. 2.10). Плата має 8 входів, що дозволяє одночасно фіксувати вісім різних параметрів.



Рисунок 2.10 – Плата сполучення

## 2.5 Методика комплексної діагностики дизельних двигунів

Для визначення надлишкового тиску у впускному колекторі, що забезпечується ГТН, використовується датчик тиску повітря (рис. 2.7), що входить до пропонованого діагностичного комплексу, який встановлюється в порожнину верхньої кришки блоку циліндрів (Т-150, Т-150К) (рис. 2.11) або порожнину лівого впускного колектору (К-700).



Рисунок 2.11 – Місце встановлення датчика тиску на двигуні СМД-62

За основу взято методику визначення залежності зміни тиску наддуву від частоти обертання колінчастого валу при повному завантаженні двигуна, що розроблена в АЧДП Асатуряном С.В. [3].

Відповідно до цієї методики значення потужності визначається на режимі вільного розгону. Повне завантаження двигуна забезпечується при розгоні трактора на вищій передачі від мінімальної до максимальної частоти обертання колінчастого валу двигуна при різкому збільшенні подачі палива.

При розгоні трактора діагностичний комплекс розміщується у кабіні трактора (рис. 2.12).



Рисунок 2.12 – Комплекс, що підготовлений для запису показників тиску наддуву

Живлення системного блоку та монітора здійснюється за допомогою інвертора напруги (рис. 2.13), який у свою чергу живиться від електричної системи трактора, що досліджується.



Рисунок 2.13 – Інвертор напруги

Методика визначення технічного стану турбокомпресора полягає в наступному:

1. Виконати операції з технічного обслуговування системи мащення двигуна, промити або замінити фільтруючі елементи системи очистки повітря, перевірити щільність прилягання впускного та випускного фланців до турбокомпресора, а також впускного та випускного колекторів до головок циліндрів.

2. Розгорнути діагностичний комплекс: встановити датчик тиску (рис. 2.7, 2.11); встановити датчик частоти обертання маховика (рис. 2.4).

3. Запустити та прогріти дизель до температури картерної оливи 80...90°C.

4. Шляхом різкого збільшення подачі палива розігнати трактор на найвищій передачі.

5. Визначити показники зміни тиску повітря, що забезпечується ГТН, на всьому діапазоні частот обертання колінчастого валу двигуна та порівняти з граничними.

6. Перевірити роботу турбокомпресора за вибігом. Для цього дати попрацювати 3...5 хвилин при мінімально стійкій частоті обертання колінчастого валу, встановити максимальну подачу палива та після розгону вимкнути подачу палива, зупинивши двигун. Обертання ротора турбокомпресора повинно прослуховуватися не менше 5 секунд після зупинки дизеля.

Залежно від отриманих результатів дається рекомендація щодо можливості подальшої експлуатації турбокомпресора або необхідності його ремонту.

Визначення дійсного моменту інерції досліджуваного двигуна проводиться у наступній послідовності.

1. Привести момент інерції виготовленого «маховика» до досліджуваного двигуна за формулою:

$$I_m^{np} = I_m i_{BB\Pi}^{-2} \sum \eta_n, \quad (2.5)$$

де  $I_m^{np}$  – приведений момент інерції «маховика»;  $I_m$  – момент інерції «маховика»;  $i_{BB\Pi}$  – передавальне співвідношення від ВВП до колінчастого валу;  $\sum \eta_n$  – сумарний ККД передач від ВВП до колінчастого валу.

2. По черзі розігнати дизель, що діагностується без «маховика» і з «маховиком», і за отриманими закономірностями обертання колінчастого валу двигуна визначити відповідні значення його кутового прискорення на номінальному режимі.

3. Визначити передавальне відношення між колінчастим валом та валом відбору потужності (ВВП) за відомими формулами.

Частота обертання валу відбору потужності та колінчастого валу фіксується двома індукційними датчиками розташованими: один на ВВП за допомогою пристрою КІ-13941 (рис. 2.14), другий – у кожусі маховика колінчастого валу двигуна.



Рисунок 2.14 – Пристрій КІ-13941

4. Визначити дійсний приведений момент інерції двигуна за відомою формулою.

*Дослідження нерівномірності роботи циліндрів двигуна.* Нерівномірність роботи циліндрів залежить від додаткової частки потужності кожного циліндра окремо, яка в свою чергу залежить від трьох факторів: стану циліндро-поршневої групи кожного циліндра, якості регулювання та стану клапанів газорозподільного механізму кожного циліндра, а так само кількості та якості розпилю впорскуваного палива в кожен циліндр (рис. 2.15) [6, 10].



Рисунок 2.15 – Чинники, що впливають на нерівномірність роботи дизеля

Методика визначення нерівномірності роботи циліндрів дизеля розглядається в цілому, не поділяючи за впливом на неї кожного з факторів окремо. Якщо енергетичні параметри дизеля загалом і нерівномірність роботи перебувають у допустимих межах, визначення впливу окремих чинників не вимагається. Методика визначення нерівномірності роботи дизеля полягає в наступному:

1. Розгорнути діагностичний комплекс (установити датчик частоти обертання колінчастого валу (рис. 2.4)).
2. Запустити та прогріти дизель до температури картерної оливи 80...90°C;
3. Налаштувати програму, що входить до комплексу постачання АЦП.

4. Встановити мінімально стійкі оберти колінчастого валу, а потім різко встановити важіль паливного насоса у положення, що відповідає максимальній подачі палива.

5. Зробити запис процесу розгону під час роботи двигуна на всіх циліндрах.

6. Почергово зробити запис процесу розгону при відключенні подачі палива до кожного циліндра.

7. Обробити отримані дані, зробити висновок.

Отримані дані вносяться до зведеної таблиці зміни ефективної потужності двигуна, на підставі якої можна побудувати графіки зміни ефективної потужності при почерговому відключенні подачі палива в циліндри на всьому діапазоні частоти обертання колінчастого валу. Практичне значення має «додаткова потужність», що відповідає кожному циліндру при номінальній частоті обертання колінчастого валу.

З отриманої таблиці та графіків робиться висновок про технічний стан окремих циліндрів.

*Виявлення залежності зміни тиску у паливопроводах системи живлення.* Технічний стан паливної системи, особливо у зоні високого тиску, значною мірою впливає на показники ефективності роботи дизельних двигунів. Найбільш ефективним є комплексне діагностування, в результаті якого виявляють несправності конкретних деталей та дають висновок про необхідність проведення робіт з регулювання, ремонту або заміни окремих вузлів та механізмів системи живлення [9, 11].

Якщо уважно розглянути процес зміни тиску палива в магістралі високого тиску, то за характерними ділянками та їх розташуванням щодо позначки ВМТ можна виявити більшість несправностей паливної апаратури високого тиску.

У загальному випадку зміну тиску в паливопроводі між паливним насосом і форсункою можна подати у вигляді «теоретичної» осцилограми

(рис. 2.16). Розглянемо зміну тиску на «теоретичній» осцилограмі по ділянках:

- ділянка 1 – постійний тиск свідчить про задовільну роботу нагнітального клапана та голки розпилювача;
- ділянки 2 та 3 – початок відкриття нагнітального клапана;
- ділянка 4 – голка форсунки піднімається та відбувається падіння тиску;
- ділянка 5 – внаслідок нагнітального ходу плунжера тиск збільшується;
- ділянка 6 – припиняється подача палива насосом;
- ділянка 7 – закриття голки розпилювача;
- ділянка 8 – відбувається закриття нагнітального клапана насоса;
- ділянка 9 – під впливом відбитих хвиль відбуваються загасаючі коливання тиску.

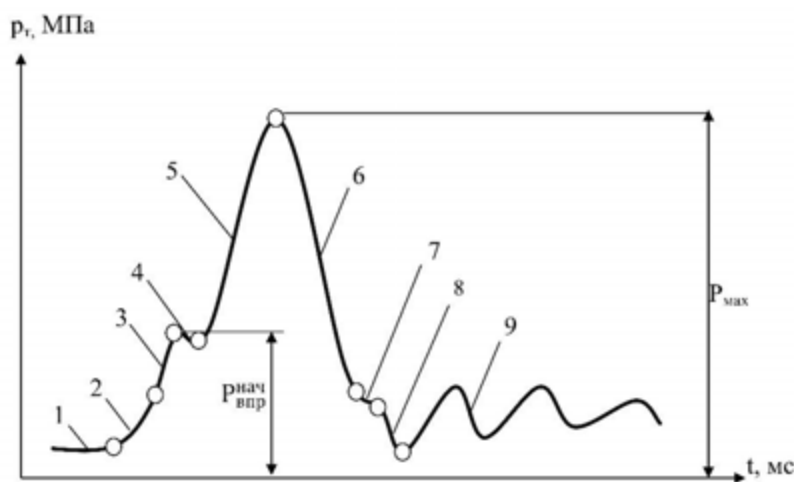


Рисунок 2.16 – Теоретична осцилограма зміни тиску у паливопроводі

Аналіз зміни тиску в паливопроводі дає можливість виявляти такі несправності, як нещільність прилягання голки і розпилювача, прихоплювання голки, тріщини корпусів форсунок і втулок плунжера, поломки пружин та ін.

Оціночною характеристикою стану секції паливного насоса є максимальний тиск у паливній магістралі даної секції, який залежить від зношування плунжерної пари, стану розпилювача, регулювання форсунки

та паливного насоса. Підвищення тиску впорскування викликається заклинюванням голки або затисканням її регулювальною пружиною, закоксуванням розпилювача, а також підвищенням циклової подачі палива насосом. Падіння максимального тиску впорскування викликають зменшення затягування регулювальної пружини, підвисання голки та обрив носика розпилювача форсунки, а також падіння циклової подачі палива насосом.

На рис. 2.17 представлено «еталонну» осцилограму зміни тиску в паливопроводі, що відповідає номінальним значенням параметрів технічного стану паливного обладнання.

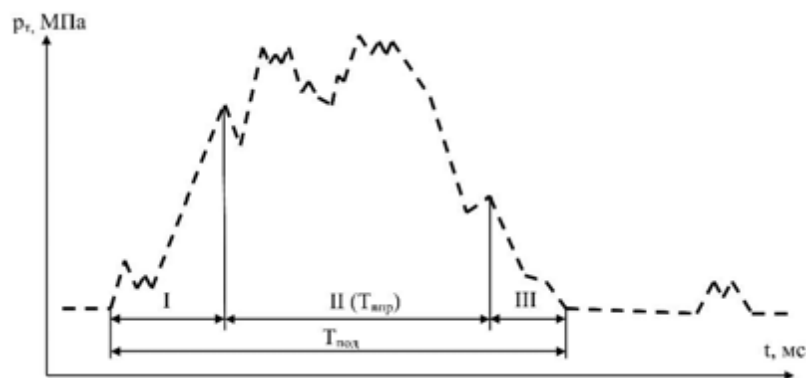


Рисунок 2.17 – «Еталонна» осцилограма зміни тиску у паливопроводі

На «еталонній» осцилограмі можна виділити три характерні ділянки:

- ділянка I характеризується збільшенням тиску палива у паливопроводі до моменту відкриття голки форсунки (відповідає 1-3 ділянці теоретичної осцилограми (рис. 2.16));
- ділянка II характеризується упорскуванням палива в циліндр двигуна (відповідає 4-7 ділянці теоретичної осцилограми);
- ділянка III характеризується падінням тиску після закриття голки розпилювача до моменту закриття нагнітального клапана насоса (відповідає 8-9 ділянці теоретичної осцилограми).

Методика діагностування системи живлення дизельних двигунів здійснюється в наступному порядку:

1. Розгорнути діагностичний комплекс (встановити датчик тиску на паливопровід високого тиску першого циліндра (рис. 2.6).

2. Запустити та прогріти дизель до температури картерної оливи 80...90°C.

3. Налаштувати програму.

4. Встановити частоту обертання колінчастого валу, що відповідає мінімальним обертам холостого ходу.

5. Зафіксувати показання датчиків за допомогою плати АЦП.

6. За отриманими даними побудувати осцилограму зміни тиску.

7. Порівняти отриману осцилограму з «еталонною» (рис. 2.17).

8. Проаналізувати стан цієї секції насоса та форсунки.

9. Виконати аналогічні операції на інших форсунках (якщо немає можливості одночасно встановити датчики тиску на кожну форсунку).

*Визначення кута випередження подачі палива.* Одним із найважливіших показників, що впливають на ефективність роботи двигуна, є правильно встановлений кут випередження подачі палива (КВПП). Запропонований діагностичний комплекс дозволяє проконтролювати правильність встановлення кута випередження подачі палива.

Методика визначення кута випередження подачі палива полягає в наступному:

1. Розгорнути діагностичний комплекс: встановити датчик частоти обертання маховика (рис. 2.4), встановити індукційний датчик положення ВМТ у картері маховика замість шпильки фіксації ВМТ (рис. 2.4, 2.5).

2. Встановити датчик тиску на паливопровід високого тиску на місці його з'єднання з форсункою першого циліндра (рис. 2.6).

3. Запустити та прогріти дизель до температури картерної оливи 80...90°C.

4. Налаштувати програму, що входить до комплексу постачання АЦП.

5. Встановити частоту обертання колінчастого валу, що відповідає режиму максимальної подачі палива.

6. Зафіксувати показання датчиків за допомогою плати АЦП.

7. Визначити кут випередження подачі палива за сумісною осцилограмою та порівняти його з рекомендованими значеннями.

Поєднана осцилограма (рис. 2.18) є графіками зміни ЕРС використовуваних датчиків у функції часу.

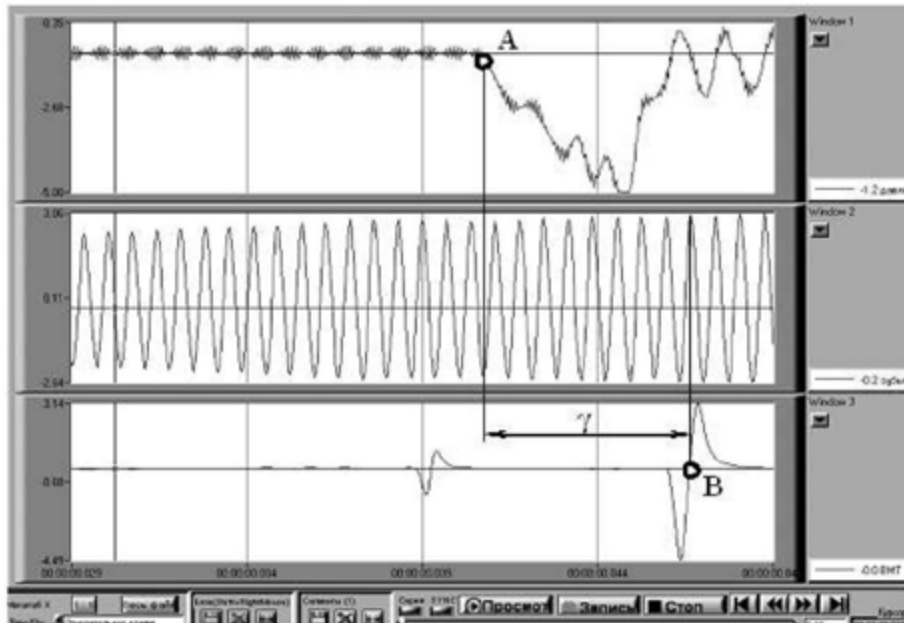


Рисунок 2.18 – Поєднана осцилограма зміни ЕРС датчиків тиску в паливопроводі, частоти обертання та положення ВМТ

Осцилограма у верхньому вікні (window 1) показує зміну тиску у паливопроводі. Осцилограма в середньому вікні (window 2) показує зміну ЕРС залежно від положення зубців вінця маховика відносно датчика частоти обертання колінчастого валу. Осцилограма у нижньому вікні (window 3) показує зміну ЕРС залежно від положення контрольного отвору ВМТ на маховику.

Програма з комплекту АЦП дозволяє в реальному часі поєднати дані осцилограми, а потім провести їхній аналіз.

## РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Програма експериментальних досліджень

Метою експериментальних досліджень є перевірка працездатності розробленої методики та комплексу, що її реалізує, для діагностування дизельних двигунів. Мета експериментальних досліджень реалізується шляхом порівняння результатів діагностування основних показників двох дизельних двигунів за стандартними та запропонованими методиками.

Для вирішення поставлених завдань було прийнято таку програму експериментальних досліджень:

1. Дослідити особливості зняття основних показників, що характеризують роботу дизельного двигуна та укомплектувати діагностичний комплекс датчиками для їх фіксації.

2. Провести діагностування двох двигунів за стандартними методиками.

3. Провести діагностування тих самих двигунів розробленим діагностичним комплексом за запропонованою методикою.

4. Виконати хронометраж операцій комплексного діагностування двигунів за стандартними та запропонованими методиками.

### 3.2 Методика діагностування основних показників дизелів

*Об'єкт дослідження.* За складеною програмою експериментальних досліджень було проведено діагностування двох двигунів СМД-62 тракторів Т-150К.



Рисунок 3.1 – Досліджувані трактори Т-150К

*Визначення повторності дослідів.* При невизначеності меж зміни вимірюваної величини, для зменшення кількості повторностей задаємося граничною помилкою в частках середньоквадратичного відхилення  $\pm 3\sigma$ . Для проведення вимірювань, пов'язаних з визначенням закономірностей та значення величин, що є основою для подальшого розрахунку, цілком достатня довірча ймовірність  $\alpha = 0,95$  та необхідна кількість повторностей дослідів  $n = 5$ .

*Діагностика енергетичних показників двигуна та витрати палива.* Процес діагностування двигунів на гальмівному стенді за стандартною методикою (ДСТУ 18509-88) складається з низки дослідів з поступовим підвищенням навантаження на двигун від холостого ходу до максимальної потужності, а потім до максимального крутного моменту.

Проведення гальмівних випробувань дозволяє отримати регуляторну характеристику двигуна.

При значних перевантаженнях, під час проведення гальмівних випробувань, досліджуваний двигун відчуває велике теплове та механічне навантаження. У зв'язку з цим кількість повторностей вимірювань та їх тривалість на цих режимах, по можливості, потрібно зменшувати.

Методика визначення енергетичних та паливо-економічних показників полягає в наступному:

1. Двигун завантажити до необхідного режиму та підтримувати це навантаження постійним.

2. Виміряти необхідні показники роботи двигуна (частоту обертання колінчастого валу, крутний момент, тиск наддуву, годинна витрата палива) на заданому режимі.

3. За отриманими результатами обчислити ефективну потужність та питому витрату палива.

4. Перейти на наступний режим роботи двигуна, встановити нове навантаження та провести дослід у тій самій послідовності.

5. Результати дослідження вносяться до протоколу.

Діагностування потужносних та паливно-економічних параметрів досліджуваних двигунів проводилося відповідно до ДСТУ 18509-88 на балансірному динамометрі МПБ-49.3/36 (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – Балансірний динамометр МПБ-49.3/36

Усі показники роботи досліджуваних двигунів реєструвалися апаратурою ОПД-17 (рис. 3.3).



Рисунок 3.3 – Апаратура ІОПД-17

Показники температури та вологості повітря фіксувалися метеометром TESTO-400. Показання атмосферного тиску фіксувалося барометром-анероїдом БАММ. Тиск у системах двигуна визначався трьома манометрами типу МО та манометром МТП-160.

Вимірювання температур у системах двигуна проводилось термометрами ТК-5.03. Хронометрування операцій діагностування здійснювалось механічним секундоміром СОПр-2а-3-000.

*Діагностика паливної апаратури.* Перевірку технічного стану форсунок проводили за допомогою діагностичного приладу для форсунок (рис. 3.4), який входить до комплекту стенду для перевірки та регулювання паливної апаратури НЦ-104 №1. LU0004.



Рисунок 3.4 – Прилад для діагностики форсунок

Зняті з випробуваних дизелів форсунки почергово були перевірені на відповідність тиску початку впорскування палива та якість розпилювання палива.

*Перевірка настановного кута випередження подачі палива* на випробуваних тракторах проводилася відповідно до стандартної методики за допомогою кутоміру КІ-13926 та моментоскопу КІ-4941.

Проведена перевірка технічного стану автоматичної муфти випередження впорскування палива. Для досліджуваних дизелів вона проводилася за стандартною методикою. В ТУ на діагностику автоматичної муфти використовують до чотирьох точок. В експлуатаційних умовах

рядових господарств використовують дві точки. Однак, нам для оцінки роботи муфти та визначення кута випередження подачі палива на всіх частотах обертання необхідно знімати не два значення, а цілу низку точок, щоб отримати залежність. За стандартною методикою діагностування муфти за двома точками займає деякий час (3...5 хвилин без урахування підготовчих робіт) отже, зі збільшенням кількості точок час цієї процедури значно збільшується. Тому прийнято рішення знімати точки від 100 до 1100 об/хв кулачкового валу ПНВТ із кроком 100 об/хв. Кожен замір необхідно проводити п'ять разів, а довірна ймовірність у цьому випадку дорівнюватиме 0,95.

Паливні насоси НД-22/6 були демонтовані з досліджуваних двигунів і розміщені на стенді НЦ-104 (рис. 3.5).

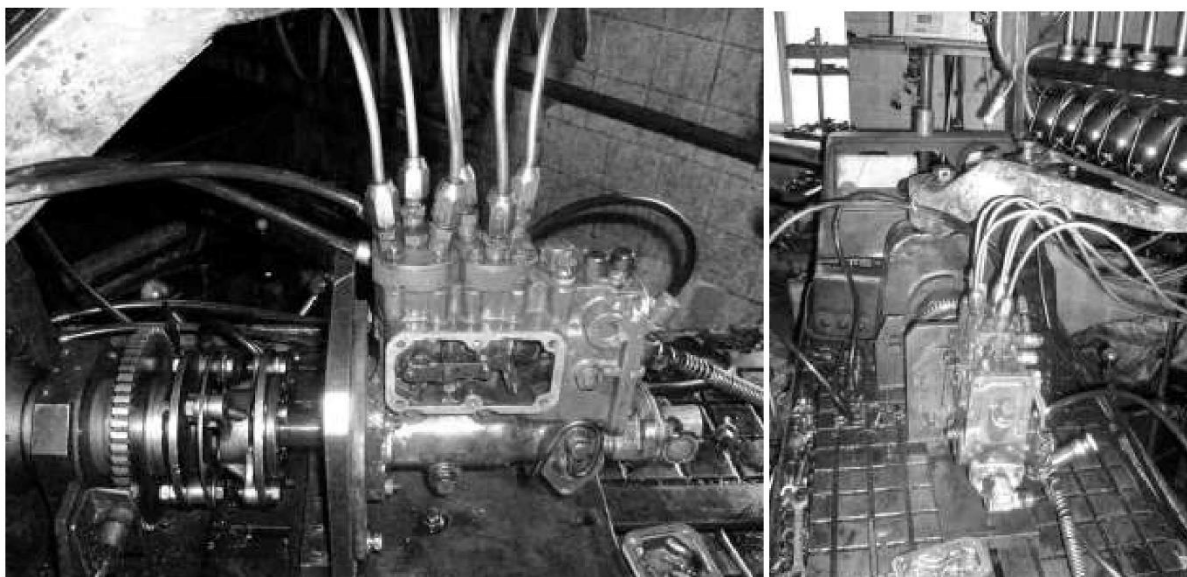


Рисунок 3.5 – Діагностування ПНВТ та автоматичної муфти випередження впорскування палива на стенді НЦ-104

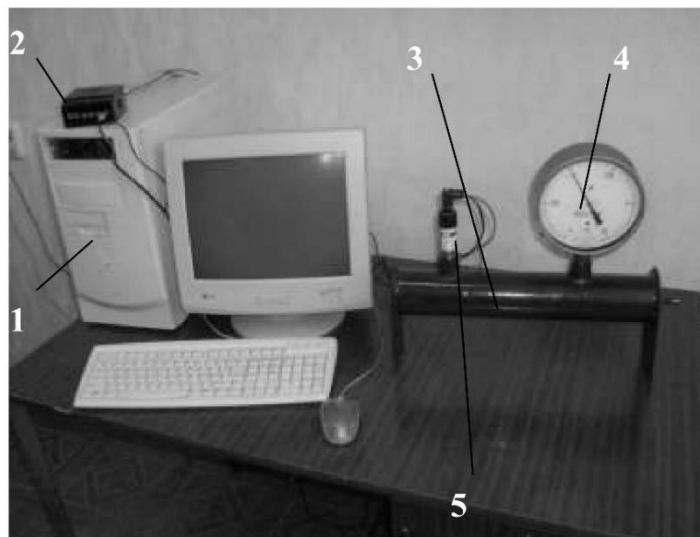
*Діагностика основних показників двигуна за запропонованою методикою.* Розроблена комплексна методика діагностики дозволяє в залежності від типу додаткового обладнання (наявність турбокомпресора і автоматичної муфти) визначити наступні параметри роботи дизельного двигуна:

1. Тиск наддуву по всьому діапазону частот обертання колінчастого валу (для турбованих двигунів).

2. Справжній момент інерції двигуна.
3. Потужність двигуна на всьому діапазоні частот обертання колінчастого валу.
4. Рівномірність роботи циліндрів, з аналізу потужності окремих циліндрів.
5. Стан паливної апаратури високого тиску за закономірністю зміни тиску в паливопроводах високого тиску на підставі порівняння отриманих осцилограм тиску з еталонними.
6. Наставний кут випередження подачі палива.
7. Стан автоматичної муфти випередження упорскування палива на основі аналізу її роботи на всьому діапазоні частот обертання колінчастого валу.

*Підготовка діагностичного комплексу та досліджуваного двигуна.*  
Перед початком діагностики досліджуваних двигунів було проведено калібрування датчиків.

Тарування датчика тиску ПД100-ДІ0.1 проводилося за допомогою тарувальної установки (рис. 3.6).



1 – ПК з платою АЦП, 2 – плата сполучень, 3 – ресивер, 4 – механічний манометр, 5 – датчик тиску, що тарується

Рисунок 3.6 – Загальний вигляд тарувальної установки для датчика тиску наддуву

Тарування проводилося в 5-кратній повторності, в результаті були отримані інформаційні файли, на підставі яких був побудований графік тарування (рис. 3.7). Справжні значення тиску наддуву коригувалися відповідно до графіку тарування.

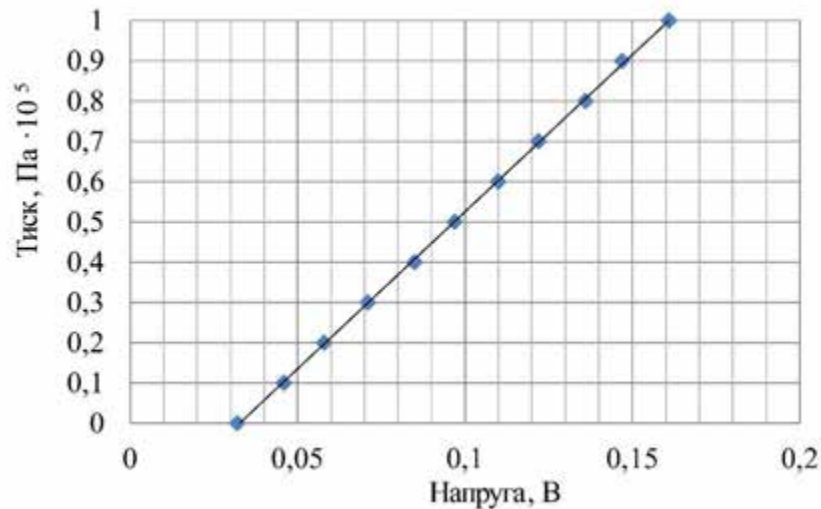


Рисунок 3.7 – Тарувальний графік датчика надлишкового тиску

Тарування датчика тиску палива в паливопроводі проводилося на установці тарування (рис. 3.8).

Тарування проводилося в 5-кратній повторності, в результаті якої були отримані дані та побудований графік тарування (рис. 3.8). Справжні значення тиску в паливопроводі коригувалися на підставі графіку тарування.



1 – персональний комп'ютер з платою АЦП; 2 – плата сполучень;  
3 – форсунка; 4 – тарований датчик тиску

Рисунок 3.8 – Загальний вид тарувальної установки для датчика тиску в паливопроводі

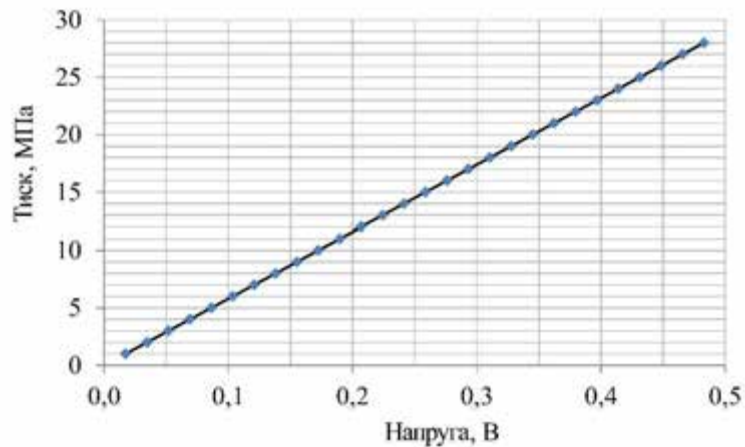


Рисунок 3.9 – Тарувальний графік датчика тиску в паливопроводі

Підготовка до діагностування полягає у підготовці настановних місць (отворів) та встановлення датчиків, що входять до складу комплексу.

Індукційний датчик частоти обертання колінчастого валу фіксується на технологічному вікні кожуха маховика за допомогою перехідної плити на відстані 2...3 мм від зубів (рис. 3.10, а).

Датчик тиску наддуву ПД100-ДИ0.1 герметично встановлюється на впускний колектор за допомогою штуцера та повітряного шлангу (рис. 3.10, б).

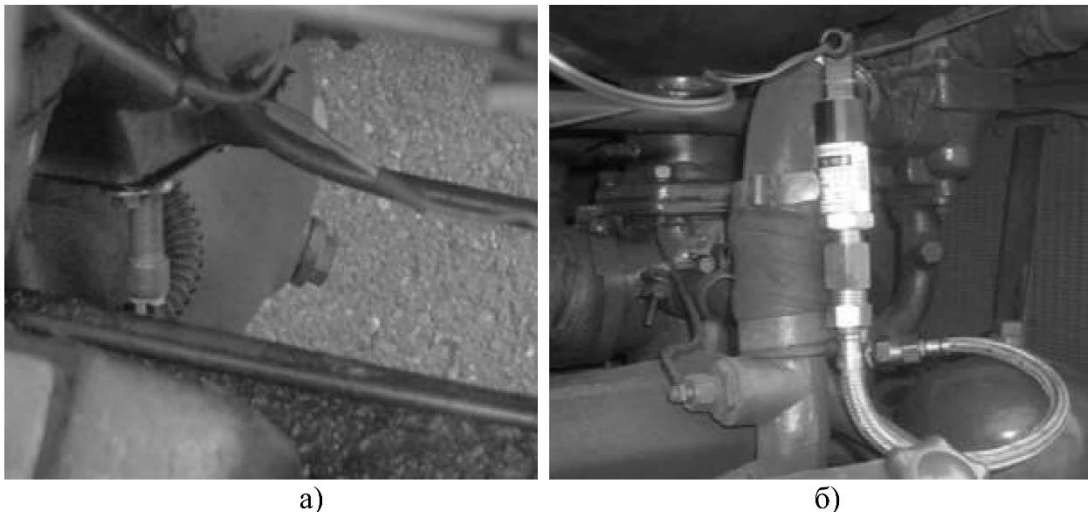


Рисунок 3.10 – Встановлення датчиків на двигуні СМД-62

Для встановлення датчика положення ВМТ на маховику, поруч із міткою, що відповідає положенню першого циліндра ВМТ – 1 (рис. 3.11) було попередньо підготовлено технологічний отвір діаметром 8 мм.

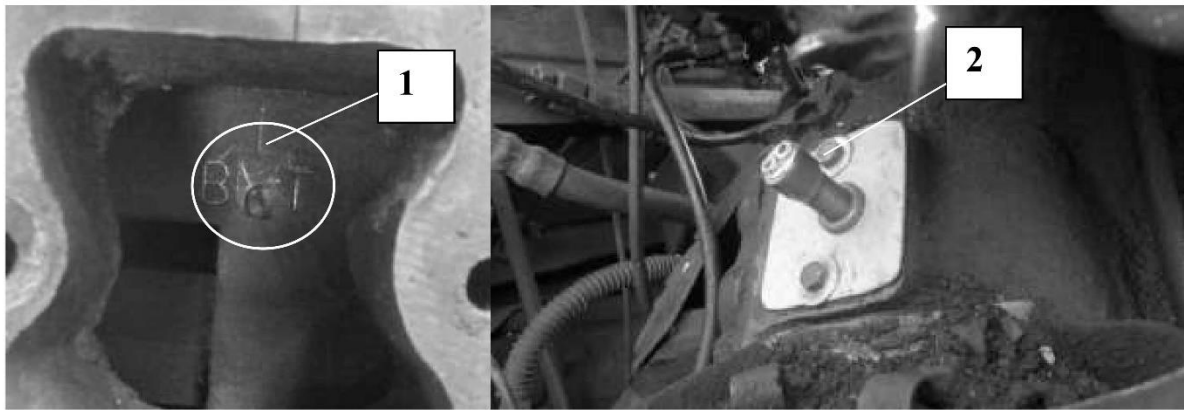


Рисунок 3.11 – Датчик положення ВМТ на двигуні СМД-62

Навпроти підготовленої мітки на кришці верхнього вікна картера маховика встановлюється індукційний датчик ВМТ – 2 (рис. 3.11).

Датчик тиску палива встановлюється між форсункою першого циліндра двигуна та паливопроводом (рис. 3.12).



Рисунок 3.12 – Встановлення датчику тиску на паливопроводі високого тиску двигуна СМД-62

Після встановлення датчиків, для отримання достовірних даних, розраховуємо частоту опитування плати АЦП, у відповідність до максимальної частоти обертання колінчастого валу та кількості зубів маховика випробуваного двигуна. Мінімальна частота опитування визначається умовою фіксації датчиком не менше семи точок за час проходження одного зуба.

## РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 4.1 Результати діагностування параметрів досліджуваних двигунів за стандартними методиками

Двигуни діагностували за загальноприйнятою методикою (ДСТУ 18509-88), результати якої наведені в акті «Про результати гальмівних випробувань двигуна СМД-62 (№ 176721) трактора Т-150К та двигуна СМД-62 (№ 186416) трактора Т-150К». За результатами цієї діагностики будується відповідна регуляторна характеристика (див. рис. 4.1, 4.2).

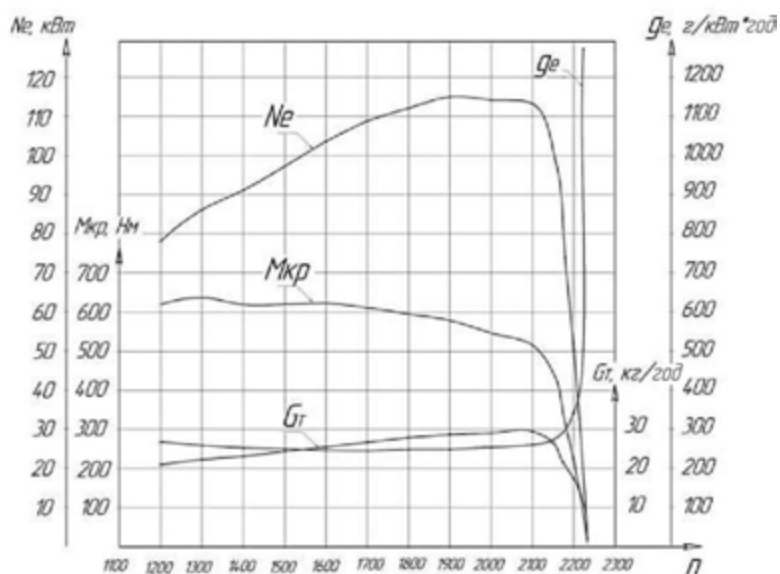


Рисунок 4.1 – Регуляторна характеристика двигуна №176721

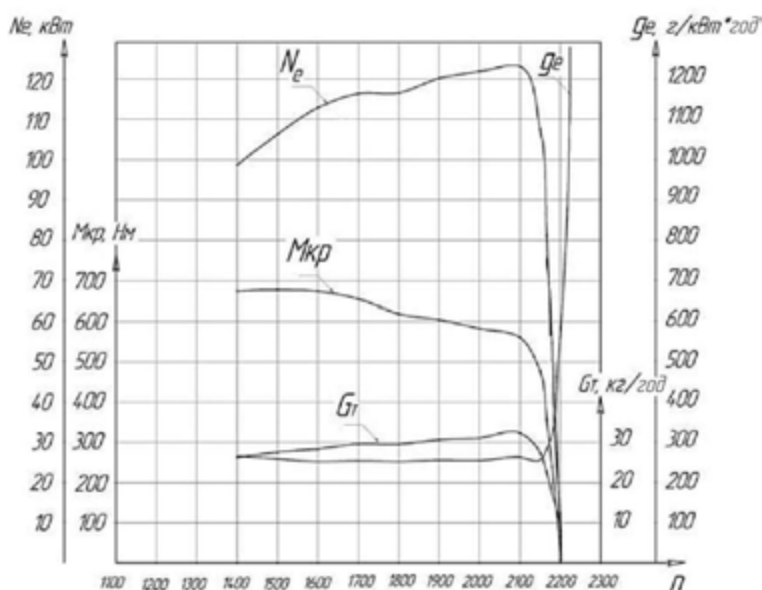


Рисунок 4.2 – Регуляторна характеристика двигуна №186416

При знятті гальмівних характеристик двигунів тиск наддува фіксувався на всьому діапазоні кутових швидкостей.

Отримані результати вимірювання тиску наддуву досліджуваних двигунів представлені у вигляді графіків (рис. 4.3, 4.4).

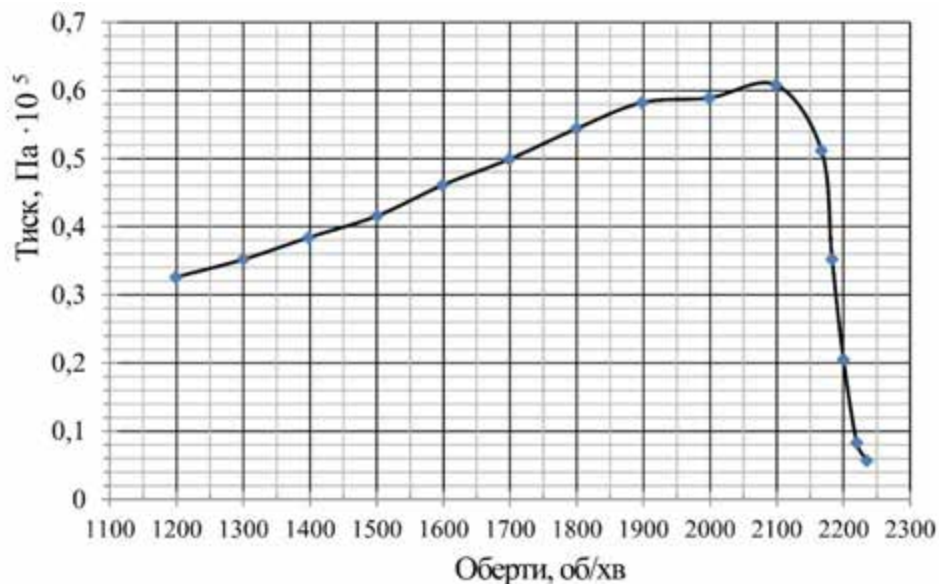


Рисунок 4.3 – Залежність тиску наддуву від частоти обертання колінчастого валу двигуна №176721

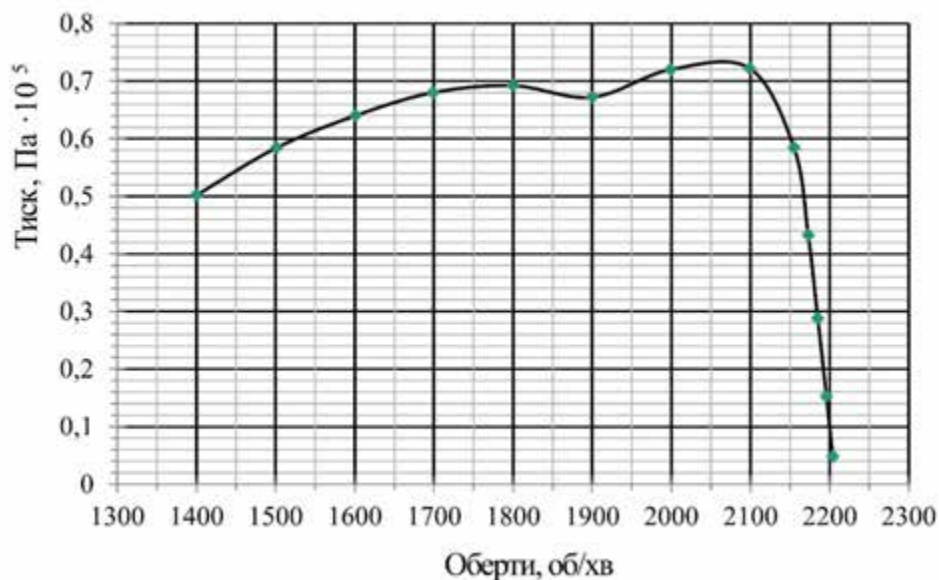


Рисунок 4.4 – Залежність тиску наддуву від частоти обертання колінчастого валу двигуна №186416

Результати діагностування форсунок за стандартною методикою за допомогою приладу для діагностики форсунок, що входить до комплекту

стенду для перевірки та регулювання паливного обладнання НЦ-104, наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Середні значення тиску початку упорскування палива форсунками досліджуваних двигунів за стандартною методикою

Порядковий номер форсунки	Тиск впорскування палива форсункою, МПа	
	Двигун №176721	Двигун №186416
1	17,5	17,8
2	18,2	18,2
3	17,9	17,9
4	17,6	17,4
5	17,8	17,6
6	17,8	17,7

Перевірку встановленого кута подачі палива на випробовуваних тракторах проводили за загальноприйнятою методикою кутоміром КІ-13926 та моментометром КІ-4941. Для двигунів № 176721 та № 184616 дані кути складають  $26^\circ$  і  $27^\circ$  відповідно.

*Результати діагностики параметрів досліджуваних двигунів за запропонованими методиками. Результати діагностики за запропонованою методикою випробування двигуна представлені у вигляді графіків.*

Відповідно, тиск повітря у впускному трубопроводі, що забезпечується ГТН на номінальних обертах колінчастого валу, має бути не менше  $3,5 \cdot 10^5$  Па. Виявивши характер залежностей тиску наддуву від обертів колінчастого валу досліджуваних двигунів СМД-62, визначимо граничні значення тиску наддуву по всьому діапазону швидкостей (рис. 4.5 та 4.6).

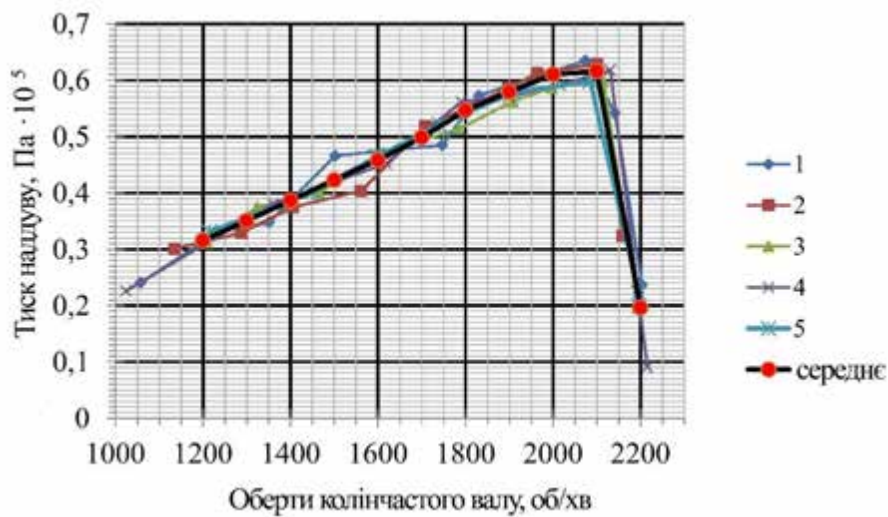


Рисунок 4.5 – Залежність тиску наддуву від частоти обертання колінчастого валу двигуна №176721

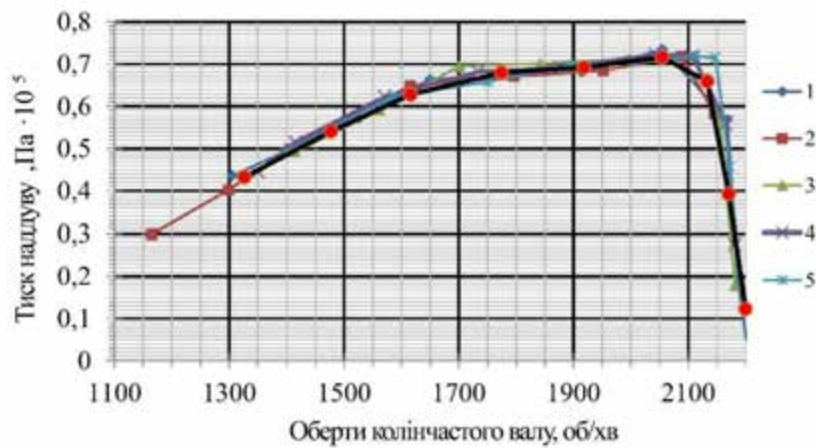


Рисунок 4.6 – Залежність тиску наддуву від частоти обертання колінчастого валу двигуна №186416

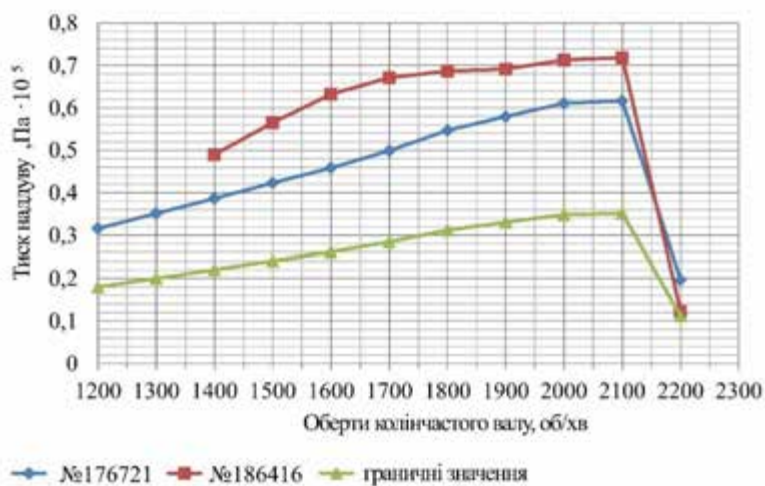


Рисунок 4.7 – Залежність граничних значень тиску наддуву ГТН від частоти обертання колінчастого валу двигунів СМД-62

За графічною залежністю (рис. 4.7) отримано рівняння регресії та визначено частинні коефіцієнти для двигунів СМД-62, що характеризують залежність граничних значень тиску наддуву на всьому діапазоні частот обертання колінчастого валу:

$$p_n^{non} = 420 - 1,2n + 1,4 \cdot 10^{-3} n^2 - 8 \cdot 10^{-7} n^3 + 2 \cdot 10^{-4} n^4 - 3 \cdot 10^{-14} n^5. \quad (4.1)$$

Умовою можливості подальшої експлуатації ГТН є виконання нерівності

$$p_n^{вим} > p_n^{non}. \quad (4.2)$$

Таким чином, використання розробленої методики та діагностичного комплексу дозволяє адекватно оцінити стан турбокомпресора в експлуатаційних умовах, без його демонтажу та дорогого діагностичного обладнання.

З отриманих за методикою, розробленою АЧДП, залежностей тиску наддуву від частоти обертання колінчастого валу і рівняння (4.3) регресії для двигунів СМД-62 [1]

$$N_e = 0,006441 N_{BH}^2 + 0,00003135 N_{BH} p_n + 55,76, \quad (4.3)$$

визначаємо значення ефективної потужності досліджуваних двигунів по всьому діапазоні частот обертання колінчастого валу.

На підставі проведених досліджень побудовані графіки залежностей ефективної потужності від частоти обертання колінчастого валу двигуна за 5 повторів, що представлені на рис. 4.8 і 4.9.

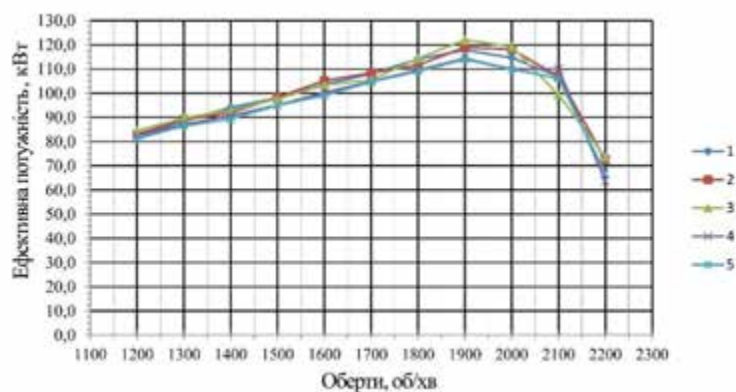


Рисунок 4.8 – Залежність ефективної потужності від частоти обертання колінчастого валу двигуна №176721

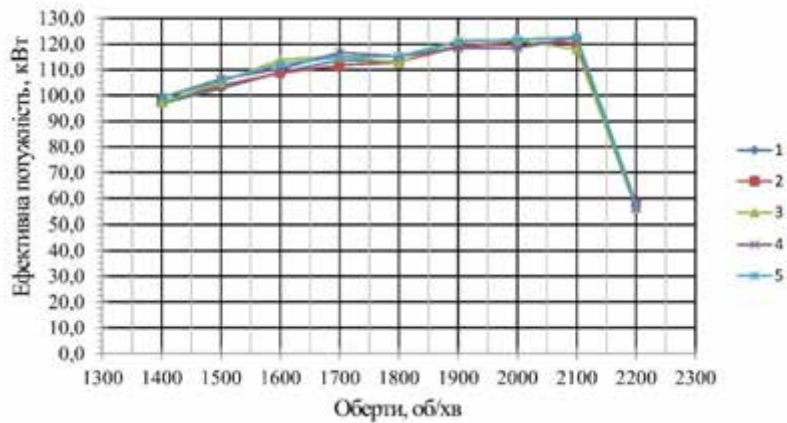


Рисунок 4.9 – Залежність ефективної потужності двигуна без наддуву від частоти обертання колінчастого валу двигуна №186416

На рис. 4.10 та 4.11 представлені графіки залежностей ефективної потужності від частоти обертання колінчастого валу досліджуваних двигунів, що отримані за стандартною та запропонованою методиками

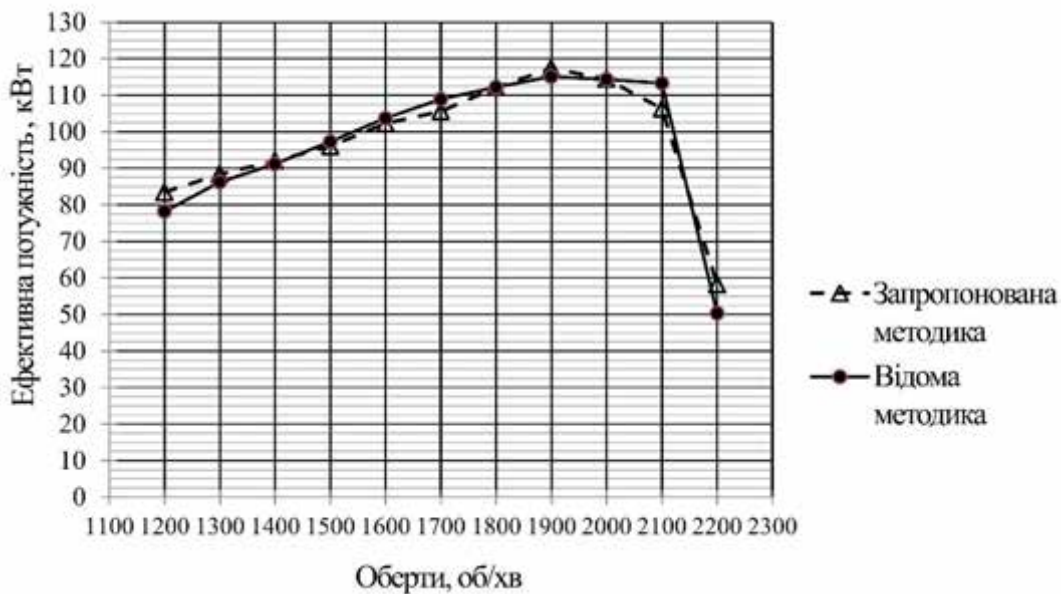


Рисунок 4.10 – Залежності ефективної потужності від частоти обертання колінчастого валу двигуна №176721, що отримані за стандартною та запропонованою методиками

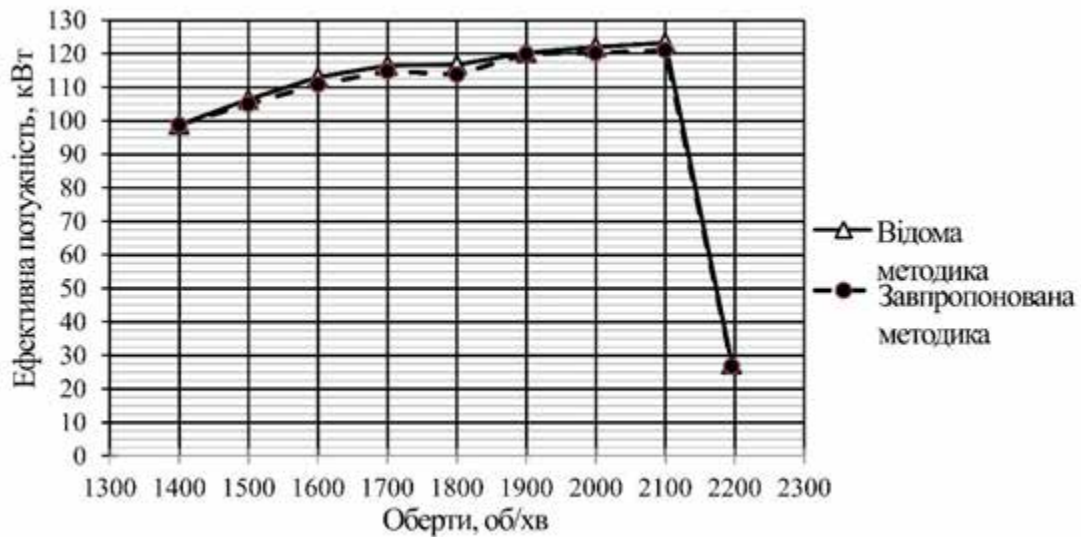


Рисунок 4.11 – Залежності ефективної потужності від частоти обертання колінчастого валу двигуна №186416, що отримані за стандартною та запропонованою методиками.

Аналізуючи графіки залежностей зміни ефективної потужності від частоти обертання колінчастого валу (рис. 4.10 та 4.11), що отримані за стандартною та запропонованою методиками, видно, що характер зміни даних залежностей дуже близький. Таким чином, використання розробленої методики та діагностичного комплексу дозволяє адекватно оцінити енергетичні показники досліджуваних двигунів в експлуатаційних умовах, без застосування дорогого обладнання.

#### 4.2 Результати хронометражу операцій комплексного діагностування двигунів за стандартними та запропонованими методиками

Відповідно до п. 2.3 виконано хронометрування операцій комплексного діагностування двигунів за стандартними та запропонованими методиками, результати якого представлені в графічному вигляді – рис. 4.12.

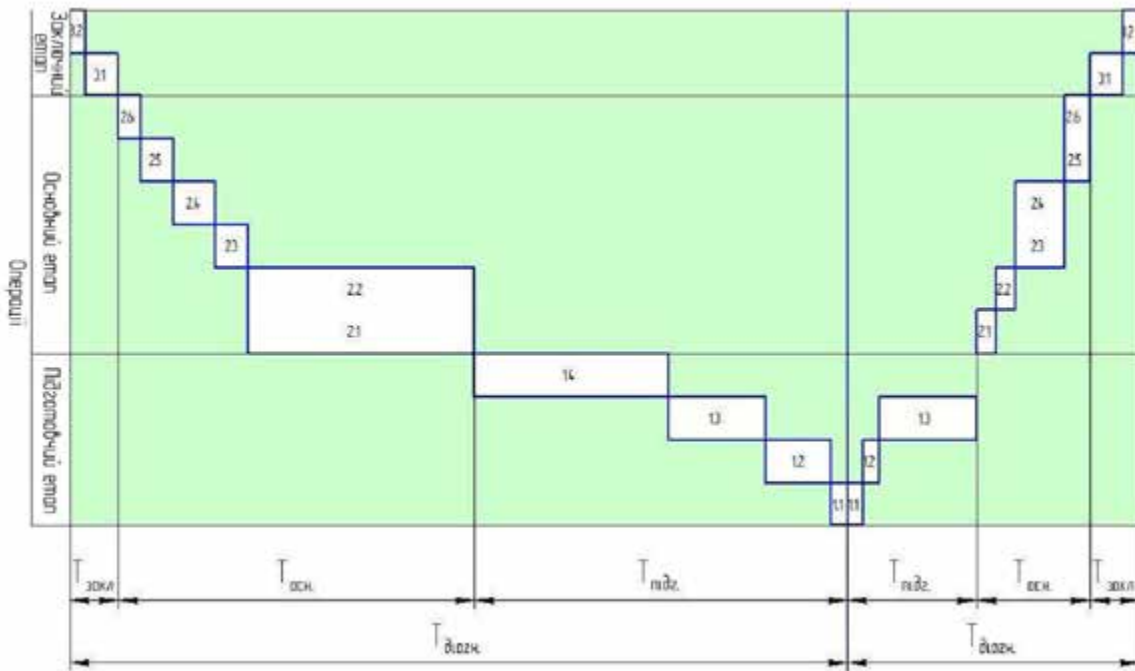


Рисунок 4.12 – Результати хронометрування операцій комплексного діагностування двигунів за стандартними та запропонованими методиками

Таблиця 4.1 – Результати хронометрування операцій комплексного діагностування двигунів за стандартними та запропонованими методиками

Найменування (код) операції	Трудоємність, люд·год	
	Стандартні методики	Запропонована методика
<b>1. Підготовчий етап</b>	<b>3,83</b>	<b>1,33</b>
1.1 Зовнішній огляд двигуна	0,17	0,17
1.2 Розгортання обладнання та під'єднання датчиків	0,67	0,17
1.3 Прогрів двигуна	1,00	1,00
1.4 Монтажно-демонтажні роботи	2,00	-
<b>2. Основний етап</b>	<b>3,09</b>	<b>0,90</b>
2.1 Діагностування ГТН	2,33	0,20
2.2 Діагностування енергетичних показників		0,20
2.3 Діагностування форсунок	0,33	0,5
2.4 Діагностування ПНВТ	0,43	
<b>3. Заключний етап</b>	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>
3.1 Визначення залишкового ресурсу	0,33	0,33
3.2 Складання рекомендацій (заповнення діагностичної карти)	0,17	0,17
<b>Трудоємність комплексного діагностування</b>	<b>7,42</b>	<b>2,73</b>

За результатами хронометрування можна зробити висновок, що загальна трудоемність діагностування за запропонованою методикою менше від трудоемності стандартної методики на 63,2%.

## ВИСНОВКИ

1. Аналіз стану проблеми показав, що при діагностиці дизельних двигунів доцільніше використовувати універсальні прилади та комплекси, які дозволяють здійснювати комплексну діагностику двигунів та їх систем. Найбільший інтерес представляє методика діагностування технічного стану дизельних двигунів, що заснована на оцінці їх динамічних якостей, проте для диференціювання можливих несправностей, вона потребує вдосконалення та розробки додаткових методик та засобів, що їх реалізують.

2. Удосконалена методика дає змогу визначити залежність основних параметрів, за якими можна оцінити технічний стан турбокомпресора, циліндро-поршневої групи, системи паливоподачі дизеля з газотурбінним наддувом.

3. Для реалізації вдосконаленої методики скомплектований діагностичний комплекс, що складається з персонального комп'ютера з розробленим програмним забезпеченням, плати аналого-цифрового перетворення, плати сполучення, індукційних датчиків імпульсів, датчиків тиску (наддува і палива), інвертора напруги і маховика з відомим моментом інерції, що дозволяє з достатньою точністю діагностувати стан турбокомпресора, циліндро-поршневої групи та системи паливоподачі дизелів з газотурбінним наддувом на всьому діапазоні частот обертання колінчастого валу.

4. Визначено рівняння регресії та частинні коефіцієнти для досліджуваних двигунів СМД-62.

5. Застосування розробленого діагностичного комплексу дає змогу скоротити часові та трудовитрати в цілому на 63,2%.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abdullah, N.R., Shahrudin, N.S., Mamat, A.M.I., Kasolang, S., Zulkifli, A., and Mamat, R. (2013). Effects of air intake pressure to the fuel economy and exhaust emissions on a small si engine. *Procedia Engineering*, 68.
2. Basurko, O.C. and Uriondo, Z. (2015). Condition-based maintenance for medium speed diesel engines used in vessels in operation. *Applied Thermal Engineering*, 80.
3. Cai, C., Weng, X., and Zhang, C. (2017). A novel approach for marine diesel engine fault diagnosis. *Cluster Computing*, 20.
4. Cai, Y., Xu, Z., Wen, Q., Shi, J., Zhong, F., Yang, X., ..., and Zhou, H. (2023). Fault states diagnosis of marine diesel engine valve based on a modified vgg16 transfer learning method. *Mathematical Problems in Engineering*.
5. Chen, Y. and Liu, C. (2022). Research on adaptive diagnosis algorithm for fuel injection failure system of construction machinery diesel engine. *International Journal of Wireless and Mobile Computing*, 22(1).
6. Fu, C., Lu, K., Li, Q., Xu, Y., Gu, F., Ball, A., and Zheng, Z. (2023). Physics-based modelling for on-line condition monitoring of a marine engine system. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(6). GMI (2023). Marine diesel engine market size & trends analysis, 2023-2032. *Global Market Insights*.
7. Hou, L., Zhang, J., and Du, B. (2020). A fault diagnosis model of marine diesel engine fuel oil supply system using pca and optimized svm. *Journal of Physics: Conference Series*, 1576(1).
8. Hu, J., Yu, Y., Yang, J., and Jia, H. (2023). Research on the generalisation method of diesel engine exhaust valve leakage fault diagnosis based on acoustic emission. *Measurement*, 210.
9. Huo, Z., Zhang, Y., Jombo, G., and Shu, L. (2020). Adaptive multiscale weighted permutation entropy for rolling bearing fault diagnosis. *IEEE Access*, 8.
10. Jiang, Z., Mao, Z., Wang, Z., and Zhang, J. (2017). Fault diagnosis of internal combustion engine valve clearance using the impact commencement detection method. *Sensors*, 17(12).

11. Kamaltdinov, V.G., Markov, V.A., Lysov, I.O., Zherdev, A.A., and Furman, V.V. (2019). Experimental studies of fuel injection in a diesel engine with an inclined injector. *Energies*, 12(14).
12. Kocak, G., Gokcek, V., and Genc, Y. (2023). Condition monitoring and fault diagnosis of a marine diesel engine with machine learning techniques. *Pomorstvo*, 37(1).
13. Krogerus, T.R., Hyvönen, M.P., and Huhtala, K.J. (2016). A survey of analysis, modeling, and diagnostics of diesel fuel injection systems. *J. Eng. Gas Turbines Power*, 138(8).
14. Liang, Q., Knutsen, K., Vanem, E., Zhang, H., and Æsøy, V. (2023). Unsupervised anomaly detection in marine diesel engines using transformer neural networks and residual analysis. 4(1).
15. Luo, M., Guo, Y., Andre, H., Wu, X., and Na, J. (2021). Dynamic modeling and quantitative diagnosis for dual-impulse behavior of rolling element bearing with a spall on inner race. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 158.
16. Maharana, K., Mondal, S., and Nemade, B. (2022). A review: Data preprocessing and data augmentation techniques. *Global Transitions Proceedings*, 3(1).
17. Paul, D. (2020). A history of electric ship propulsion systems [history]. *IEEE Industry Applications Magazine*, 26(6).
18. Qin, S.J. (2012). Survey on data-driven industrial process monitoring and diagnosis. *Annual reviews in control*, 36(2).
19. Sahin, S., Tolun, M., and Hassanpour, R. (2012). Hybrid expert systems: A survey of current approaches and applications. *Expert Systems with Applications*, 39.
20. Shi, Q., Hu, Y., and Yan, G. (2023). Fault diagnosis of marine diesel engine fuel injector with novel IRCMDE method. *Polish Maritime Research*, 30(3).

21. Singh, S., Howard, C., Hansen, C., and Köpke, U. (2018). Analytical validation of an explicit finite element model of a rolling element bearing with a localized line spall. *Journal of Sound and Vibration*, 416.
22. Szyman'ski, G.M. and Tomaszewski, F. (2016). Diagnostics of automatic compensators of valve clearance in combustion engine with the use of vibration signal. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 68.
23. Tadros, M., Ventura, M., and Guedes Soares, C. (2020). Optimization of the performance of marine diesel engines to minimize the formation of sox emissions. *Journal of Marine Science and Application*, 19.
24. Tasdemir, S., Saritas, I., Ciniviz, M., and Allahverdi, N. (2011). Artificial neural network and fuzzy expert system comparison for prediction of performance and emission parameters on a gasoline engine. *Expert Systems with Applications*, 38(11).

## ДОДАТКИ